Müller, Joh.,
Lindig Joh

Grundriß

der

Experimental-Physik.

Grundriß

der

Experimental-Physik.

Für

Lyceen, Gymnasien, Gewerbe- und Realschulen,

sowie zum

Selbstunterrichte.

Von

Dr. Joh. Müller,

Professor der Physik und Technologie an der Universität zu Freiburg im Breisgau.

Dritte vermehrte und verbesserte Auflage.

Mit 532 in den Text eingedruckten Holzschnitten.

Braunschweig,

Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn.

1852.

Vorrede zur ersten Auflage.

Schon kurz nach dem Erscheinen der ersten Lieferungen meiner Bearbeitung von Pouillet's Physik wurde ich von verschiedenen Seiten zur Herausgabe eines »Grundrisses der Physik zum Gebrauche für Gymnasien und Gewerbschulen« aufgefordert, einer Arbeit, die ich um so eher unternehmen zu können glaubte, als ich auf der einen Seite durch mehrjährigen Unterricht an dem Gymnasium zu Darmstadt und der Realschule zu Gießen mit den Bedürfnissen dieser Anstalten in Beziehung auf den physikalischen Unterricht vertraut war, auf der andern Seite aber die Benutzung meines größeren Werkes, namentlich aber der in demselben enthaltenen Abbildungen, welche mir auch für den Grundriß zu Gebote standen, mir die Arbeit sehr erleichterten.

Der Druck der ersten Bogen dieses Grundrisses hat schon vor zwei Jahren begonnen; ich war aber durch die alsbald nöthig gewordene zweite Auflage meines größeren Lehrbuchs genöthigt, ihn bis nach Vollendung derselben liegen zu lassen, wodurch jedoch dem Buche gewiß nur Vortheile erwachsen sind, indem die Verbesserungen jener zweiten Auflage auch diesem Grundrisse zu Gute kommen.

Im Wesentlichen bin ich dem Gange des größeren Lehrbuchs gefolgt, und diejenigen Stellen, welche ich ohne Weiteres für den Zweck dieses Grundrisses passend fand, sind wörtlich aus demselben entnommen. Ich bin nämlich der Ansicht, daß die Grundgesetze auch in Schulanstalten gründlich und klar vorgetragen werden müssen, daß hier eine Abkürzung in der Darstellung nur nachtheilig seyn kann. Dagegen darf man diesen Unterricht nicht mit zu vielen Einzelnheiten und Entwickelungen überladen, welche ein nur rein wissenschaftliches Interesse haben und bei dem Elementarunterrichte nur die Klarheit der Uebersicht stören würden; ich habe deshalb unter andern die Lehre von der Polarisation und doppelten Brechung des Lichts nur angedeutet.

Möge es mir gelungen seyn, durch diese Schrift zur Hebung des Unterrichts in der Naturlehre in höheren Schulanstalten auch ein Scherflein beigetragen zu haben.

Freiburg, im Mai 1846.

Dr. Joh. Müller.

Vorrede zur zweiten Auflage.

Der aufmerksame Leser dieses »Grundrisses der Physik« wird finden, daß diese zweite Auflage desselben gegen die erste nicht allein durch neues Material bereichert, sondern daß sie auch fast in allen Theilen eine verbesserte genannt werden kann. Von der Ueberzeugung ausgehend, daß gerade für Elementarwerke nicht allein eine zweckmäßige Auswahl des Stoffes, sondern vor allen Dingen auch eine geeignete Form der Darstellung von der größten Wichtigkeit sey, habe ich mich in allen Abschnitten des Werkes zu feilen, zu vollenden und abzurunden bemüht, ohne jedoch eine wesentliche Veränderung in der Anordnung des ganzen Buches vorzunehmen, wozu mir auch durchaus kein Bedürfniß vorhanden schien.

Die meisten Zusätze und Veränderungen hat begreiflicher Weise die Elektricitätslehre erhalten, weil gerade dieser Zweig der Physik jetzt am meisten cultivirt wird. Um die neuen Faraday'schen Entdeckungen verständlich zu machen, war es nöthig, in die Lehre vom Licht auch noch das Wesentlichste über Circularpolarisation aufzunehmen.

Freiburg, im November 1849.

Dr. Joh. Müller.

Vorrede zur dritten Auflage.

Diese Auflage unterscheidet sich von den beiden vorhergehenden wesentlich dadurch, daß der letzte Abschnitt derselben, welcher die Meteorologie behandelte, ganz weggeblieben ist, indem ich mich, mehrfachen Aufforderungen folgend, entschlossen habe, die physikalischen Erscheinungen des Weltraums und der Erdoberfläche in einem selbstständigen Werkchen zu behandeln. Der nun übrig bleibende Theil, welcher die Experimentalphysik allein enthält, hat in Plan und Eintheilung keine Veränderung erfahren, wohl aber sind auch dießmal alle einzelnen Kapitel in Betreff der Darstellung verbessert und an Inhalt bereichert worden. Eine besondere Sorgfalt ist den Figuren zugewendet worden, indem der größte Theil der Holzstiche dieser Auflage durch ganz neue und bessere ersetzt ist.

Freiburg, im August 1852.

Dr. Joh. Müller.

Einleitung.

Begriff. Die großartigen Schauspiele, welche uns die Natur täglich darbietet, regen unsere Wißbegierde so mächtig an, daß wir uns unwillkürlich hingerissen fühlen, über die Gesammtheit der Ursachen nachzudenken, welche diese wunderbaren Wirkungen hervorbringen. Es ist nun die Aufgabe der Naturwissenschaften, sich mit diesen Fragen zu beschäftigen, den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Naturerscheinungen zu ermitteln, und sie, so weit es möglich ist, auf ihre Ursachen zurückzuführen. 1

Die gesammten Naturwissenschaften haben es mit Körpern zu thun; hier ist aber das Wort »Körper« nicht in dem Sinne des Mathematikers zu nehmen, der nur die Raumverhältnisse betrachtet und nicht nach dem Stoffe fragt, welcher den Raum erfüllt, der Naturforscher betrachtet gerade die Eigenschaften der den Raum erfüllenden Materie.

Das innere Wesen der Körper ist uns verschlossen, sie sind uns nur durch die äußere Erscheinung bekannt, d. h. wir wissen von ihnen unmittelbar nur das, was wir durch die Vermittelung unserer Sinne von ihnen erfahren. Ein Körper außer Zusammenhang mit unseren Sinnen ist für uns so gut wie nicht vorhanden. Es ist möglich, ja wahrscheinlich, daß noch Manches in der Natur um uns her vorgeht, wovon wir keine Ahnung haben, weil uns dafür gewissermaßen ein Sinn fehlt.

Die Naturwissenschaften haben nun zwischen den, durch Vermittelung der Sinne zum Bewußtsein gebrachten Erscheinungen einen Zusammenhang auszumitteln, und sie so zusammenzustellen, wie sie sich einander erläutern und bedingen. Ist man im Stande, eine Erscheinung auf ihren Zusammenhang mit anderen zurückzuführen, so ist diese Erscheinung erklärt, und man kennt ein Naturgesetz, sobald man die unveränderliche Zusammenhangsart von Naturerscheinungen kennt, wenn uns auch die letzten Ursachen unbekannt bleiben.

Eintheilung. Das große Gebiet der Naturwissenschaften zerfällt zu- 2
nächst in zwei große Abtheilungen, die Naturbeschreibung und die Naturlehre. Die Naturbeschreibung, gewöhnlich Naturgeschichte genannt,

lehrt uns die Beschaffenheit einzelner Gegenstände kennen und ordnet sie nach ihrer Aehnlichkeit in Systeme, die Naturlehre will dagegen die Naturgesetze der Körperwelt zur Einsicht bringen.

Die Physik ist derjenige Theil der Naturlehre, welcher es mit den Gesetzen derjenigen Erscheinungen zu thun hat, die nicht auf einer Veränderung der Bestandtheile der Körper beruhen, denn damit beschäftigt sich die Chemie.

Begreiflicher Weise läßt sich das Feld dieser beiden Wissenschaften nicht immer scharf trennen, und viele Erscheinungen müssen sowohl in der einen, wie auch in der anderen besprochen werden. Beide Wissenschaften sind auf's Innigste mit einander verwandt, ja sie bilden gewissermaßen ein Ganzes, welches nur deshalb äußerlich getrennt erscheint, weil die Masse des zu untersuchenden Materials zu sehr angewachsen ist.

3 **Methode.** Es handelt sich nun zunächst darum, den Weg zu bezeichnen, auf welchem man zur Erkenntniß der Naturgesetze gelangen kann und auf welchem in der That alles bis jetzt Erkannte gefunden worden ist. Die Erkenntnißquelle sowohl, als auch der Weg zur Erkenntniß ist nicht und kann nicht für alle Wissenschaften derselbe seyn. Der Mathematiker kann, von selbstgeschaffenen Begriffen ausgehend, aus sich heraus seine ganze Wissenschaft entwickeln, ja es wäre denkbar, daß ein Mensch in seinen vier Wänden, abgeschlossen von aller Naturanschauung, die ganze Mathematik aus den Begriffen des Raumes und der Zahl construirte. In dieser Beziehung ist die Mathematik eine rein speculative Wissenschaft, was die Naturwissenschaften durchaus nicht sind und nicht seyn können, da sie Dinge behandeln, welche einzig und allein durch sinnliche Wahrnehmung, also auf dem Wege der Erfahrung, zu unserem Bewußtseyn kommen.

Den Alten war eine auf Erfahrung sich stützende Naturforschung in unserem Sinne gänzlich unbekannt; wir finden bei ihnen nur philosophische Speculationen über die Welt überhaupt, über die Entstehung und das Urwesen aller Dinge, und es kann uns nicht wundern, wenn die auf diesem Wege entwickelten Vorstellungen über die Natur der Dinge oft nichtssagend sind, oder sogar mit der Erfahrung in directem Widerspruche stehen.

Auch im Mittelalter wurden die Naturwissenschaften nur wenig weiter entwickelt, theils weil die ganze geistige Thätigkeit jener Zeit anderen Interessen zugewendet war, theils weil die aristotelische Philosophie in so hohem Ansehen stand, daß dadurch jede weitere Prüfung der in derselben ausgesprochenen Naturansichten, und also auch jeder Fortschritt abgeschnitten war.

Erst Galiläi schlug den Weg der Erfahrung ein und Baco von Verulam zeigte, daß es nur auf diese Weise möglich sey, zur Kenntniß der Naturgesetze zu gelangen.

Die einzige Quelle unserer Naturerkenntniß ist die sinnliche Wahrnehmung, die Erfahrung, die Beobachtung. Aus dieser Quelle schöpfen wir das Material, welches durch unser geistiges Zuthun zur Wissenschaft verarbeitet und vereinigt werden soll.

Die wissenschaftlichen Wahrnehmungen machen wir entweder an Veränderungen, die uns die Natur selbst darbietet, oder wir versetzen die Körper durch Kunst unter solche Umstände, wodurch sie genöthigt werden, gewisse Erscheinungen hervorzubringen. Im ersten Falle stellen wir eine Beobachtung, im zweiten einen Versuch an.

Durch gute Beobachtungen und zweckmäßig angestellte Versuche lernen wir den äußeren Zusammenhang der Erscheinungen kennen. Dieser Zusammenhang ist es, was wir ein Naturgesetz nennen.

Auf dem Wege der Erfahrung können wir zur Kenntniß dieser Gesetze gelangen, wenn uns auch der innere Zusammenhang, die Natur der Kräfte, das Wesen der Dinge, ganz und gar unbekannt ist. Das Gesetz der Brechung des Lichts war lange schon bekannt, ehe man über die Natur des Lichts im Reinen war; ebenso kennen wir die Gesetze der elektrischen Vertheilung, obgleich wir über das Wesen der Elektricität selbst so gut wie nichts wissen.

Nur der äußere, nicht der innere Zusammenhang kann durch die Erfahrung gefunden werden. Ueber die inneren Ursachen der Erscheinungen, über das Wesen der Kräfte, welche sie hervorbringen, können wir nur Hypothesen aufstellen. Diese Hypothesen sind gleichsam Fragen, die man an die Natur stellt, worauf sie aber nicht mit Ja und Nein antwortet, sondern: es kann so seyn, oder: es kann nicht so seyn.

Aus der Hypothese, die man über die Ursache mehrerer zusammenhängender Erscheinungen aufgestellt hat, lassen sich meistens weitere Folgerungen ziehen, welche durch fernere Beobachtungen entweder bestätigt oder als unzulässig erkannt werden. Je mehr Thatsachen sich mit Hülfe einer Hypothese erklären lassen, je mehr sie durch neue Beobachtungen bestätigt wird, desto mehr Wahrscheinlichkeit gewinnt sie.

In allen Zweigen der Physik finden wir Beispiele und Belege für die Richtigkeit der eben ausgesprochenen Ansichten.

Erster Abschnitt.

Allgemeine Eigenschaften der Körper.

---

4 Da sich die Physik mit Körpern beschäftigt, so ist es vor allen Dingen wichtig, daß man sich eine Vorstellung von dem Wesen dieser Körper bildet, und dazu gelangt man zunächst durch die Betrachtung der allgemeinen Eigenschaften, d. h. derjenigen Eigenschaften, welche wir an allen Körpern beobachten, so verschieden sie auch sonst seyn mögen.

Zum Wesen eines Körpers ist nothwendig, daß er einen begränzten Raum einnimmt, daß er also eine Ausdehnung hat, und daß in demselben Raum nicht zu gleicher Zeit zwei Körper vorhanden seyn können, was man mit dem Namen der Undurchdringlichkeit bezeichnet. Außer diesen beiden Eigenschaften, ohne welche die Materie gar nicht denkbar ist, beobachtet man aber noch andere allgemeine Eigenschaften, nämlich Theilbarkeit, Ausdehnbarkeit und Zusammendrückbarkeit, Porosität, Trägheit und Schwere.

5 **Theilbarkeit.** So weit unsere Erfahrung reicht, sind alle Körper theilbar, d. h. man kann sie in kleinere und immer kleinere Partikelchen zerlegen.

Wie weit aber geht diese Theilbarkeit? Kommen wir bei fortgesetzter Verkleinerung wohl zu Theilchen, die noch sinnlich wahrnehmbar, aber doch nicht weiter theilbar sind? So weit unsere Erfahrung reicht, geht die Theilbarkeit stets über die Gränzen der sinnlichen Wahrnehmung hinaus. Als Beispiel außerordentlicher Theilbarkeit führt man gewöhnlich den Moschus an, welcher Jahre lang ein ganzes Zimmer mit einem intensiven Geruch erfüllen kann, ohne merklich an Gewicht abzunehmen.

Am besten beweisen uns alle chemisch zusammengesetzten Körper, daß die Theilbarkeit über die Gränzen der sinnlichen Wahrnehmung hinausgeht. Der Zinnober z. B. ist aus Quecksilber und Schwefel zusammengesetzt, und man kann ihn leicht in diese beiden Bestandtheile zerlegen, man ist aber nicht im Stande, die kleinen Theilchen von Schwefel und Quecksilber einzeln für sich zu unterscheiden, selbst durch das beste Mikroskop betrachtet, erscheint der Zinnober doch immer noch als eine vollkommen homogene (gleichartige) Masse.

Obgleich nun die Theilbarkeit weit über die Gränzen der sinnlichen Unter-

scheidung hinausgeht, so können wir doch nicht annehmen, daß sie über alle Gränzen hinausgeht. Wollte man annehmen, daß die Theilbarkeit bis in's Unendliche fortginge, so hieße das mit anderen Worten, annehmen, daß die Größe der letzten untheilbaren Urtheilchen Null sey; wenn aber diese Urtheilchen keine Ausdehnung haben, so kann durch ihre Zusammensetzung unmöglich ein ausgedehnter Körper entstehen.

Auf diese Betrachtungen gestützt, nehmen die Physiker an, daß alle Körper aus kleinen Theilchen zusammengesetzt seyen, die nicht weiter zerlegt werden können, die untheilbar sind, und die man deshalb *Atome* nennt.

Diese Grundansicht von der Constitution der Körper ist unter dem Namen der *atomistischen Theorie* jetzt von allen Physikern und Chemikern angenommen.

Wenn man überhaupt von kleinen Theilchen redet, ohne gerade diese Urtheilchen, die Atome, bezeichnen zu wollen, so bedient man sich gewöhnlich des Wortes *Molekül*, welches mit *Massentheilchen* gleichbedeutend ist.

Ausdehnbarkeit und Zusammendrückbarkeit. Eine zweite allge- 6
meine Eigenschaft ist die *Ausdehnbarkeit* und die damit zusammenhängende *Zusammendrückbarkeit*. Ein und derselbe Körper nimmt nicht immer genau dasselbe Volumen ein; er kann durch Druck und Erkaltung verkleinert, durch Spannung und Erwärmung vergrößert werden. Nehmen wir nun an, daß die Atome ein für allemal unveränderlich sind, so läßt sich die Ausdehnbarkeit nur durch die Annahme erklären, daß die Atome nicht in unmittelbarer Berührung stehen, sondern durch Zwischenräume getrennt sind, durch deren Vergrößerung oder Verkleinerung das Volumen der Körper zu- oder abnimmt.

Porosität. Die Zwischenräume, welche sich zwischen den verschiedenen 7
Theilchen der Körper befinden, nennt man *Poren*. Bezeichnet man mit diesem Namen auch die Zwischenräume zwischen den Atomen der Körper, so ist dem oben Gesagten zufolge jeder Körper porös, die *Porosität* also eine allgemeine Eigenschaft. Im gewöhnlichen Leben versteht man aber unter Poren nur solche Zwischenräume, welche groß genug sind, um Flüssigkeiten und Gase durchzulassen. In diesem Sinne ist die Porosität freilich keine allgemeine Eigenschaft. Ein Schwamm, alle künstlichen Gewebe, Kreide, Bimsstein u. s. w. sind porös im engern Sinne des Worts.

Verschiedene Natur der Atome. Nachdem wir durch die Betrach- 8
tung der Theilbarkeit und Ausdehnbarkeit die Grundidee der atomistischen Theorie entwickelt haben, wollen wir zunächst sehen, wie sich die verschiedenen Körper aus Atomen construiren lassen, und dann erst zur Betrachtung der übrigen allgemeinen Eigenschaften übergehen.

Wir finden in der Natur eine Menge von Körpern, deren Eigenschaften so verschieden sind, daß wir nothwendig annehmen müssen, daß schon die Atome, aus denen sie zusammengesetzt sind, eine verschiedene Natur haben. Betrachten wir z. B. Schwefel und Blei; das Verhalten dieser beiden Körper ist außerordentlich verschieden, und wir können diese Verschiedenheit nur dadurch erklä-

ren, daß die Atome des Schwefels nicht von derselben Art sind, wie die des Blei's.

Die meisten Körper sind nicht aus gleichartigen, sondern aus verschiedenartigen Theilen zusammengesetzt, wenn sie auch dem Ansehen nach ganz gleichartig sind, wie wir dies beim Zinnober schon angeführt haben, der aus Schwefel und Quecksilber zusammengesetzt ist; so ist auch das Wasser aus Sauerstoff und Wasserstoff, das Kochsalz aus Chlor und Natrium zusammengesetzt u. s. w. Solche Körper heißen chemisch zusammengesetzte, im Gegensatz zu denen, die sich nicht weiter in verschiedenartige Bestandtheile zerlegen lassen, und welche man deshalb auch einfache Körper, Grundstoffe oder Elemente nennt. Man kennt 62 solcher Grundstoffe, die man bis jetzt wenigstens nicht weiter zu zerlegen im Stande war; mit der Betrachtung dieser Elemente und der Art und Weise, wie aus denselben die übrigen Körper zusammengesetzt sind, beschäftigt sich die Chemie.

9 **Aggregatzustände.** Wir beobachten an den Körpern außer den eben besprochenen noch Verschiedenheiten, die nicht von der Verschiedenheit der Bestandtheile, sondern von der verschiedenen Art und Weise herrühren, wie die Theilchen verbunden sind, ja ein und derselbe Stoff kann uns in sehr verschiedenen Formen erscheinen, wie das Wasser, welches als Eis fest, als Wasser flüssig, als Dampf aber gasförmig ist; ohne die Zusammensetzung zu ändern, können wir das Wasser in Eis und das Eis in Wasser verwandeln, wir können das Wasser verdampfen und den Dampf wieder zu Wasser verdichten.

Alle Körper, welche wir kennen, befinden sich in einem der drei beim Wasser erwähnten Zustände, sie sind entweder fest, flüssig oder gasförmig (luftförmig).

Die festen Körper haben, die geringen Veränderungen abgerechnet, welche durch die Wärme hervorgebracht werden, ein unveränderliches Volumen und eine selbstständige Gestalt; es gehört auch eine mehr oder weniger bedeutende Kraft dazu, um einen festen Körper zu zertheilen. Es ist z. B. unmöglich, ein Stück Eisen auf die Hälfte, auf den dritten Theil seines Volumens zusammenzupressen, oder zu machen, daß es den doppelten, dreifachen Raum einnimmt; nur mit großer Gewalt sind wir im Stande, seine Gestalt zu ändern oder es zu theilen.

Die Flüssigkeiten haben in demselben Sinne wie die festen Körper ein unveränderliches Volumen, d. h. wenn wir sie durch einen starken Druck auch ein klein wenig zusammendrücken können, wenn sie sich auch durch Erwärmung etwas ausdehnen, so sind diese Volumenveränderungen doch immer nur sehr unbedeutend; wir können das Wasser, welches eine Flasche ausfüllt, nicht in ein halb so großes Gefäß hineinpressen, und wenn wir es in ein doppelt so großes Gefäß hineingießen, so füllt es dieses nur zur Hälfte aus. Die Flüssigkeiten haben aber keine selbstständige Gestalt, wie die festen Körper, sondern die Gestalt des Raumes, den sie einnehmen, ist von der Form der sie einschließen-

den festen Körper, also von der Form der Gefäße abhängig; wenn eine Flüssigkeit ein Gefäß nicht ganz ausfüllt, so ist sie oben durch eine horizontale Oberfläche begränzt. Endlich unterscheiden sich die flüssigen Körper von den festen noch dadurch, daß schon die geringste Kraft hinreicht, um ihre Theilchen von einander zu trennen.

Die *gasförmigen Körper* haben weder eine selbstständige Form, noch ein bestimmtes Volumen, der Raum, den sie einnehmen, hängt nur von dem äußern Druck ab. Man kann eine Luftmasse leicht auf $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ ... $\frac{1}{10}$ ihres Volumens zusammenpressen, und umgekehrt, wenn man sie in einen 2, 4 ... 10 mal größeren leeren Raum bringt, so füllen sie auch diesen vollständig aus, wie wir später noch ausführlicher sehen werden; sie haben also ein Bestreben, sich so viel wie möglich auszudehnen. Die leichte Theilbarkeit haben die Gase mit den Flüssigkeiten gemein.

Diese äußeren Unterschiede können nach unserer Ansicht von der Zusammensetzung der Körper nur darauf beruhen, daß bei den festen Körpern die einzelnen Theilchen nicht allein in einer bestimmten Entfernung, sondern auch in einer bestimmten gegenseitigen Lage bleiben, während die Theilchen der Flüssigkeiten zwar auch in einer bestimmten Entfernung bleiben, aber doch sehr leicht sich an einander verschieben lassen; bei den gasförmigen Körpern endlich finden wir ein Bestreben der Theilchen, sich möglichst weit von einander zu entfernen.

Molekularkräfte. Da eine Kraft nöthig ist, um die Theilchen eines 10
festen Körpers von einander zu trennen, da aber auch bei den gasförmigen Körpern eine äußere Kraft nöthig ist, um die Theilchen zusammenzuhalten, so ist klar, daß die Körper nicht bloß durch eine Nebeneinanderlagerung der Atome gebildet seyn können, denn sonst würden sie nur eine unzusammenhängende Masse, einem Sandhaufen etwa vergleichbar, bilden. Es muß also Kräfte geben, welche die Theilchen der festen Körper in ihrer gegenseitigen Lage festhalten, ihnen so eine bestimmte innere Structur geben und ihre äußere Gestalt erhalten; andererseits müssen auch Kräfte vorhanden seyn, welche die Theilchen der Gase aus einander treiben.

Diese Kräfte, welche fortwährend zwischen den benachbarten Molekülen der Körper thätig sind, nennt man *Molekularkräfte*.

Die Kraft, welche die Theilchen der festen Körper zusammenhält, nennt man *Cohäsionskraft* und nimmt an, daß sie ihren Grund in einer gegenseitigen Anziehung der Atome hat.

Wenn sich aber die Atome gegenseitig anziehen, so ist nicht einzusehen, wie dieselben Atome sich gegenseitig abstoßen können; um also die Abstoßung zu erklären, welche wir bei den Gasen beobachten, müssen wir eine zweite Kraft, die *Expansionskraft*, annehmen.

Durch Erwärmung können wir feste Körper schmelzen, d. h. feste Körper in flüssige verwandeln, und durch Wärme die flüssigen Körper verdampfen, d. h. sie in den gasförmigen Zustand überführen; offenbar wirkt also die Wärme der Cohäsionskraft entgegen, und wir nehmen geradezu an, daß die Wärme mit der

eben angeführten Expansionskraft einerlei sey. Man denkt sich die Moleküle der Körper gleichsam von Wärmeatmosphären eingehüllt, welche die Anziehung der Moleküle selbst modificiren, und erklärt so, daß Anziehung und Abstoßung von denselben Mittelpunkten ausgehen. Je nachdem die Cohäsionskraft oder die Expansionskraft überwiegend ist, sind die Körper fest oder gasförmig, bei flüssigen Körpern sind sie im Gleichgewicht.

11 **Trägheit.** In der ganzen Natur kann keine Veränderung in dem Zustande der Dinge vorgehen, ohne daß sie von einer besonderen Ursache veranlaßt wird; was für Veränderungen also ein Körper auch erleiden mag, seyen es nun Veränderungen im Zustande der Ruhe oder der Bewegung, seyen es Veränderungen seines Aggregatzustandes u. s. w., immer ist, um eine solche Veränderung hervorzubringen, eine Kraft nöthig. Ist ein Körper in Ruhe, so ist eine Kraft nöthig, um ihn in Bewegung zu setzen, ist er in Bewegung, so ist eine Kraft nöthig, um ihn in Ruhe zu bringen; ein Körper, der einmal in Bewegung ist, wird seine Bewegung mit unveränderlicher Geschwindigkeit, in unveränderter Richtung fortsetzen, bis sie durch äußere Hindernisse aufgehoben wird. Man bezeichnet die eben besprochene Eigenschaft der Körper mit dem Namen der **Trägheit**, oder des **Beharrungsvermögens**.

Schon im alltäglichen Leben finden wir zahlreiche Erscheinungen, welche sich durch das Gesetz der Trägheit erklären lassen. Das Schwungrad einer Maschine läuft noch eine Weile fort, wenn auch die Kraft, welche die Maschine treibt, zu wirken aufgehört hat; es würde ewig fortlaufen, wenn die Reibung die Bewegung nicht fortwährend verzögerte.

Wenn man stark läuft, kann man nicht plötzlich einhalten, und wenn man in einem Nachen steht, fällt man mit dem Oberkörper rückwärts, wenn der Nachen eben vom Land abstößt, vorwärts, wenn er anstößt. Wir werden später Gelegenheit haben, den Einfluß der Trägheit auf viele Bewegungserscheinungen noch genauer nachzuweisen.

Dem Gesetze der Trägheit zufolge muß ein Körper jeder Kraft einen Widerstand entgegensetzen, welche ihn aus dem Zustande der Ruhe in Bewegung setzt, oder welche, wenn einmal der Körper in Bewegung ist, seine Bewegung beschleunigt, verzögert oder ganz aufzuheben strebt. Es ist demnach klar, daß die Wirkung, welche eine Kraft auf den Bewegungszustand eines Körpers ausübt, einerseits von der Größe (Intensität) der Kraft, andererseits aber auch von der Größe der Trägheit abhängt.

Je größer die Quantität der Materie, d. h. je größer die **Masse** ist, auf welche eine Kraft wirkt, desto größer ist auch der Widerstand, welchen die Kraft zu überwinden hat; wir schätzen überhaupt die **Masse** eines Körpers nach der Größe des Widerstandes, den er in Folge seiner Trägheit einer beschleunigenden oder verzögernden Kraft entgegensetzt. Diese Begriffe von Trägheit und Masse werden erst durch Späteres, namentlich durch die Lehre von der Schwere und der Bewegung recht klar und geläufig werden.

12 **Schwere.** Wenn man einen Stein, ein Stück Holz u. s. w. vom Bo-

den entfernt und dann sich selbst überläßt, so fallen sie, bis sie den Boden oder irgend einen andern Körper treffen, welcher sie aufhält. Da die Materie träg ist, so kann sie nicht von selbst aus dem Zustand der Ruhe in den der Bewegung übergehen. Wenn wir also sehen, daß ein ruhender Körper in demselben Moment sich zu bewegen beginnt, in welchem wir ihm seine Unterstützung entziehen, so müssen wir dies einer Kraft zuschreiben, und diese Kraft nennen wir Schwere.

Um die Richtung der Schwere zu bestimmen, giebt es kein besseres Mittel, als einen Faden an einem Ende irgend wie zu befestigen, und an seinem andern

Fig. 1.



Ende einen kleinen schweren Körper anzuhängen. Die Richtung des Fadens, wenn er gespannt und in Ruhe ist, fällt genau mit der Richtung der Schwere zusammen; denn wenn diese Kraft nach einer andern Linie wirkte, so würde sie den Faden nach dieser Linie hinziehen. Dieses kleine Instrument nennt man das Bleiloth, die Linie, welche der Faden für den Fall des Gleichgewichts einnimmt, nennt man die Vertikale. Die Richtung der Schwere ist also die des Bleilothes oder der Vertikalen. Nichts ist leichter, als dieselbe in jedem Augenblicke und an jedem Orte der Erde zu bestimmen.

Das Bleiloth ist überall gegen den Mittelpunkt der Erde gerichtet.

Wenn ein Körper durch irgend eine Unterlage am Fallen verhindert ist, so hört deshalb die Wirkung der Schwere nicht auf, sie äußert sich in diesem Falle durch einen Druck, welcher auf die Unterlage ausgeübt wird.

Die Schwere ist eine allgemeine Eigenschaft der Körper, d. h. sie ist nicht allein eine Eigenschaft der festen Körper, sondern sie kommt auch den Flüssigkeiten und den Gasen zu. Das Fallen der Regentropfen beweis't schon die Schwere der Flüssigkeiten, daß aber auch die Gase Schwere besitzen, daß also die ganze Luftmasse, welche unseren Erdball umgiebt, auf die Erdoberfläche drückt, dafür werden wir später noch Beweise finden.

Gewicht. Die Größe des Druckes, welchen ein Körper auf seine Unter- 13
lage ausübt, heißt sein Gewicht; dieser Druck wächst nun mit der Anzahl seiner materiellen Theilchen. Um das Gewicht verschiedener Körper mit einander zu vergleichen, bedienen wir uns der Wage, deren Anwendung allgemein bekannt ist, deren Einrichtung aber später noch beschrieben werden soll.

In Frankreich ist das Gramm gesetzlich als Einheit des Gewichts bestimmt; außerdem wird aber auch fast überall diese Gewichtseinheit ausschließlich bei wissenschaftlichen Untersuchungen angewendet. Das Gramm ist das Gewicht von einem Kubikcentimeter reinen Wassers im Zustand seiner größten Dichtigkeit.

Das französische Gewichtssystem hat den großen Vorzug vor anderen, daß die Einheit des Gewichtes und des Raummaßes in einer einfachen Beziehung stehen, so daß man leicht vom Volumen auf das Gewicht und umgekehrt schließen kann *).

*) Ein Maß ist nur dann ein für allemal als unveränderlich bestimmt zu be-

14 **Masse.** Nach der oben gegebenen Erklärung ist die Masse eines Körpers die Quantität der Materie, aus welcher er zusammengesetzt ist; von der Quantität der Materie eines Körpers hängt aber die Größe seines Beharrungsvermögens ab, und die Größe des Beharrungsvermögens ist dem Begriff nach das

---

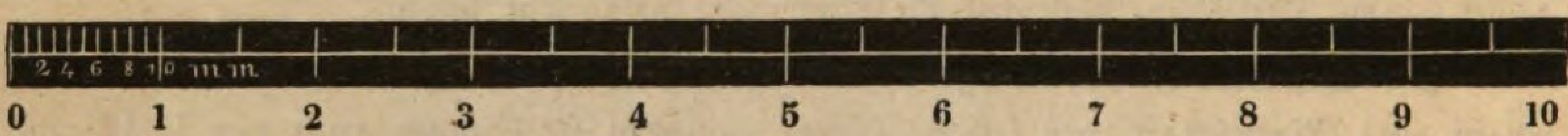
trachten, wenn es einer unveränderlichen Größe der Natur entnommen ist, und dies ist bei dem neuen französischen Maßsystem der Fall. Alle übrigen Maßsysteme haben erst durch die Vergleichung mit den französischen Maßen eine feste Bestimmung erhalten.

Die unveränderliche Größe, welcher die französische Maßeinheit entnommen ist, ist der Erdmeridian, d. h. der Umfang eines größten Kreises der Erdkugel, welcher durch die beiden Pole geht. Der 40millionste Theil dieses Umfangs ist ein Meter.

Die Länge eines Erdmeridians wurde durch eine Reihe mit der größten Sorgfalt angestellter Gradmessungen ermittelt, und bei dieser Messung die ältere französische Maßeinheit, die Toise, zu Grunde gelegt; man erfuhr auf diese Weise also zunächst, wie viel solcher Toisen der Erdmeridian enthalte, und somit war eigentlich schon die Länge der Toise fest bestimmt; da man aber nun ein ganz neues Maßsystem schaffen wollte, so nahm man den 40millionsten Theil des in Toisen ausgedrückten Erdmeridians zur neuen Längeneinheit, kurz man bestimmte nun genau das Verhältniß des Meters zur Toise.

Das Meter wird in 10 Decimeter, in 100 Centimeter, in 1000 Millimeter eingetheilt; der beigedruckte kleine Maßstab stellt ein Decimeter mit

Fig. 2.



seinen Unterabtheilungen so genau dar, als es auf diese Weise möglich ist.

Das Verhältniß der wichtigsten Längenmaße zum Meter ist in folgender Tabelle gegeben.

1 rheinländischer oder preußischer Fuß	= 313,85	Millimeter
1 englischer Fuß	= 304,79	»
1 Wiener Fuß	= 316,10	»
1 Pariser Fuß	= 324,84	»
1 Toise = 6 Paris. Fuß	= 1,94904	Meter
1 deutsche oder geographische Meile	= 7407	»
1 englische Seemeile = 1 ital. Meile	= 1852	»

Das gewöhnliche Körpermaß sowohl wie das Flüssigkeitsmaß und das Gewicht ist bei dem französischen Maßsystem vom Längenmaß abgeleitet. Die Einheit des Flüssigkeitsmaßes ist das Liter = 1000 Kubikcentimeter.

Ein Kubikcentimeter Wasser wiegt 1 Gramm. 1000 Gramm machen 1 Kilogramm aus. 1 Liter Wasser wiegt also 1 Kilogramm.

1 Gramm ist gleich 10 Decigramm = 100 Centigramm = 1000 Milligramm.

Das Pfundgewicht der verschiedenen Länder ist sehr ungleich, doch ist das Pfund in der Regel ziemlich nahe gleich 1/2 Kilogramm. Das badische und das großherzogl. hessische Pfund ist genau 1/2 Kilogramm, denn das ganze Maßsystem dieser beiden Länder ist von dem französischen abgeleitet. Dieses 500 Gramm schwere Pfund ist jetzt auch das Zollgewicht des deutschen Zollvereins.

1 preuß. Pfund	= 467,711	Gramm
1 Londoner Pfund (Troy-pound)	= 373,202	»
1 Wiener Pfund (Handelsgewicht) . . .	= 572,880	»
1 altes französisches Pfund.	= 489,506	»

eigentliche Maß der Masse. Ein bequemes Mittel, die Masse eines Körpers zu bestimmen, liefert uns aber erst die Schwere.

Die Masse eines Körpers ist stets seinem Gewichte proportional. Dieser Zusammenhang zwischen Masse und Gewicht wird uns überall durch den Versuch nachgewiesen, obgleich er dem Begriff nach nicht durchaus nöthig ist; d. h. es wäre denkbar, daß es in der Natur Körper gäbe, auf welche die Schwere gar nicht wirkt, obgleich sie deshalb nicht aufhören träge Massen zu seyn. Es wäre ferner denkbar, daß die Schwerkraft ungleich auf die Theilchen verschiedener Substanzen wirke, daß eine Bleikugel z. B. nur deshalb schwerer ist als eine gleich große Kugel von Holz, weil eben die Schwere auf ein Theilchen des Blei's vorzugsweise wirkt, ohne daß deshalb die Masse der Bleikugel größer wäre als die der Holzkugel. Denken wir uns, um die Sache recht klar zu machen, zwei gleich große Kugeln, eine von Holz, die andere von Blei, und nehmen wir einmal an, die Masse beider, d. h. ihr Beharrungsvermögen, sey gleich, so müßte offenbar die Bleikugel schneller fallen, denn wir wissen, daß die Bleikugel etwa 12mal so viel wiegt, daß also die Kraft, welche die Bleikugel fallen macht, 12mal größer ist als die, welche die Holzkugel niedertreibt; sie müßte also bei gleichem Widerstande offenbar eine größere Geschwindigkeit hervorbringen. Nun aber fällt die Bleikugel nicht schneller als die Holzkugel (wenigstens im leeren Raum), und daraus geht hervor, daß die 12mal größere Kraft, welche die Bleikugel zur Erde zieht, auch eine 12mal so große träge Masse in Bewegung zu setzen hat, daß also die träge Masse der Bleikugel 12mal so groß ist als die Masse der Holzkugel.

Da nun die Fallgeschwindigkeit für alle Körper dieselbe ist (im leeren Raum), so schließen wir auf dieselbe Weise, daß die Masse eines Körpers stets seinem Gewichte proportional sey, daß also das Gewicht eines Körpers ein Maß für seine Masse ist.

Dichtigkeit. Die *Dichtigkeit* der Körper ist das Verhältniß ihres 15
Gewichtes zu ihrem Volumen. Der Begriff der Dichtigkeit fällt mit dem des *specifischen Gewichts* zusammen. Das specifische Gewicht ist für jede Substanz eine beständige, charakteristische Eigenschaft. Um die Dichtigkeit der Körper zu bestimmen, muß man die Dichtigkeit irgend eines Körpers, und man hat dafür das Wasser im Zustande seiner größten Dichtigkeit gewählt, als Einheit annehmen. *Die Dichtigkeit oder das specifische Gewicht eines Körpers ist alsdann die Zahl, welche angiebt, wie vielmal ein Körper schwerer ist, als ein gleiches Volumen Wasser.* Ein Kubikcentimeter Eisen wiegt 7,8, ein Kubikcentimeter Gold 19,258 Gramm, während ein gleiches Volumen Wasser nur 1 Gramm wiegt, also ist 7,8 das specifische Gewicht des Eisens, 19,258 das specifische Gewicht des Goldes. *Man findet allgemein das specifische Gewicht eines Körpers, wenn man sein absolutes Gewicht durch das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser dividirt.*

Die Data also, welche man durch den Versuch bestimmen muß, um aus

denselben das specifische Gewicht eines Körpers zu berechnen, sind das absolute Gewicht desselben und das Gewicht eines gleichen Wasservolumens.

Am leichtesten ist es, diese Data für Flüssigkeiten auszumitteln. Man fülle ein Gefäß, am besten ein solches, welches oben in einen engen Hals mündet, bis zu einer bezeichneten Höhe (bis zu einem am Halse markirten Striche), einmal mit Wasser, dann mit der zu bestimmenden Flüssigkeit, und bestimme jedesmal mit Hülfe der Wage das Gewicht der in der Flasche enthaltenen Flüssigkeiten. Es sey z. B. das specifische Gewicht des englischen Vitriolöls auf diese Weise auszumitteln. Man bringe das leere Glasgefäß auf die eine Wagschale und lege auf der anderen das entsprechende Tarirgewicht auf. Nun fülle man das Gefäß bis zu dem Merkzeichen mit Wasser. Gesetzt, es halte gerade 1 Liter, d. h. 1000 Kubikcentimeter, so wird das eingegossene Wasser gerade 1000 Gramm wiegen. Füllt man nun das Gefäß mit Vitriolöl, so wird man auf der anderen Wagschale außer dem Tarirgewicht für die Flasche noch 1848 Gr. auflegen müssen, um das Gleichgewicht der Wage wieder herzustellen. Das Vitriolöl in der Flasche wiegt also 1848 Gr., während ein gleiches Volumen Wasser nur 1000 Gr. wiegt, das specifische Gewicht des Vitriolöls ist also $\frac{1848}{1000} = 1{,}848$.

Fig. 3.



Wenn man nicht so große Massen der zu bestimmenden Flüssigkeit hat, so kann man geeignete kleinere Gefäße anwenden, etwa ein solches wie Fig. 3, welches mit einem eingeriebenen Stöpsel versehen ist.

Um das specifische Gewicht fester Substanzen zu bestimmen, kann man sich aus demselben einen Körper von regulärer Gestalt formen, etwa einen Würfel, eine Kugel u. s. w., so daß es leicht ist, den kubischen Inhalt der zu untersuchenden Stücke zu berechnen. Das absolute Gewicht solcher Körper findet man durch die Wage, das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser ist durch das bekannte Volumen der Körper gegeben. Ein Würfel von Marmor z. B. wiege 21,6 Gr. Wenn nun jede Seite dieses Würfels 2 Centimeter beträgt, so ist der kubische Inhalt desselben 8 Kubikcentimeter; ein gleich großer Würfel von Wasser wird also 8 Gr. wiegen, folglich ist das specifische Gewicht des Marmors $\frac{21{,}6}{8} = 2{,}7$.

Nicht von jeder Substanz hat man solche Massen, um daraus solche reguläre Körper bilden zu können, außerdem aber ist es ungemein schwierig, ja fast unmöglich, reguläre Körper genau genug zu arbeiten. Man muß deshalb nach anderen Methoden sich umsehen, um das specifische Gewicht fester Körper zu bestimmen. Die meisten dieser Methoden beruhen auf hydrostatischen Gesetzen, welche wir erst später werden kennen lernen.

Zweiter Abschnitt.

Gleichgewicht der Kräfte.

Erstes Kapitel.

Zerlegung der Kräfte und Gleichgewicht der Kräfte an den sogenannten einfachen Maschinentheilen.

Ein Körper ist im Gleichgewicht, wenn alle auf ihn wirkenden Kräfte 16
sich gegenseitig vernichten, oder wenn ihre Wirkung durch irgend einen Widerstand aufgehoben wird. Die Wirkung der Schwere eines Körpers, welcher an einem Faden aufgehängt ist, wird durch den Widerstand des Fadens aufgehoben. Ist der Faden nicht stark genug, so reißt er und der Körper fällt zu Boden. Oft findet Gleichgewicht ohne festen Stützpunkt und ohne scheinbaren Widerstand Statt. Der Fisch kann im Wasser, der Luftballon in der Luft im Gleichgewicht seyn; hier aber ist die Schwere dieser Körper durch einen Druck aufgehoben, von dem später die Rede seyn wird.

Man kann sagen, daß alle Körper, welche uns in Ruhe erscheinen, solche sind, auf welche mehrere sich gegenseitig vernichtende Kräfte einwirken.

Die Statik beschäftigt sich damit, die Bedingungen des Gleichgewichts auszumitteln; die Dynamik dagegen untersucht die Gesetze der Bewegungen, welche entstehen, wenn den Bedingungen des Gleichgewichts nicht genügt ist.

Um Kräfte zu messen, muß man irgend eine beliebige Kraft als Einheit annehmen.

Zwei Kräfte sind gleich, wenn sie nach entgegengesetzten Richtungen auf einen Punkt wirkend sich das Gleichgewicht halten. Zwei gleiche Kräfte, die nach derselben Richtung wirken, sind der doppelten Kraft gleichzusetzen. Man würde eine dreifache Kraft haben, wenn man drei gleiche Kräfte nach derselben Richtung wirken ließe u. s. w.

Wie viele Kräfte auch auf einen materiellen Punkt wirken mögen, welches auch ihre Richtung seyn mag, so werden sie ihm doch nur eine einzige Bewegung in einer bestimmten Richtung mittheilen. Es läßt sich demnach eine Kraft denken, welche für sich allein dieselbe Wirkung hervorzubringen im Stande ist, welche also das ganze System jener Kräfte ersetzen kann. Sie führt den Namen

der Resultirenden. Wenn z. B. ein Schiff durch die gleichzeitige Wirkung des Stroms, der Ruder und des Windes getrieben wird, so bewegt es sich nach einer bestimmten Richtung; wenn die Wirkungen des Stroms, der Ruder und des Windes aufhörten, so könnte man doch offenbar dem Schiffe dieselbe Bewegung dadurch wieder ertheilen, daß man an einem Seil, welches am Schiff befestigt ist, eine bestimmte Kraft nach jener Richtung ziehen läßt, nach welcher es sich unter gleichzeitiger Einwirkung der drei Kräfte bewegte. Dies ist die Resultirende der drei Kräfte.

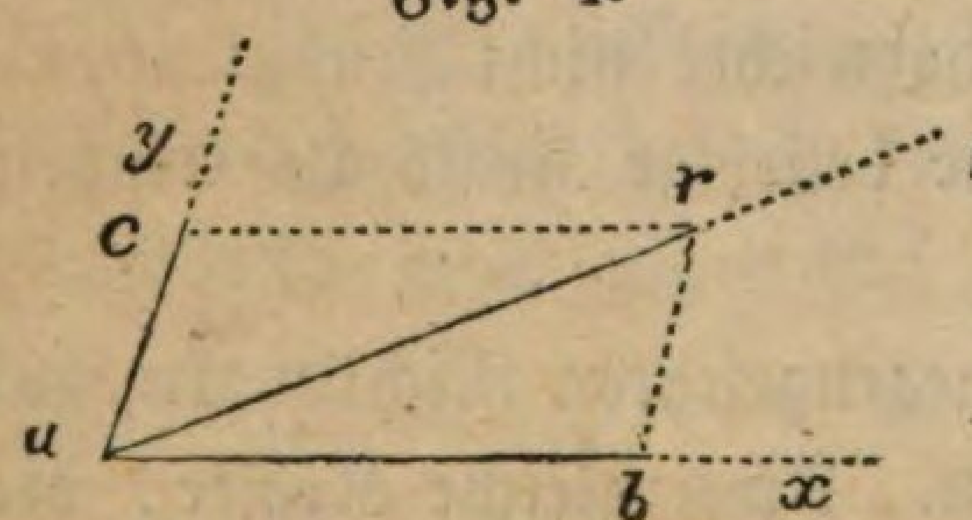
Die Gesammtheit von Kräften, welche auf einen Punkt zusammenwirken, nennt man ein System von Kräften. In Beziehung auf die Resultirende, welche die Gesammtheit der Kräfte ersetzen kann, nennt man diese auch die Seitenkräfte. Es ist klar, daß wenn man einem System von Kräften eine neue Kraft hinzufügt, welche der Resultirenden des Systems gleich und entgegengesetzt ist, daß sich alsdann alle zusammenwirkenden Kräfte das Gleichgewicht halten müssen.

Hätte man z. B., um bei dem oben angeführten Beispiele stehen zu bleiben, an einem, am Schiff befestigten Seile eine Kraft wirken lassen, welche der resultirenden Kraft des Stroms, des Windes und der Ruder gleich, aber entgegengesetzt ist, so wird diese neu angebrachte Kraft Gleichgewicht hervorbringen; das Schiff wird still stehen müssen, wie wenn es vor Anker läge.

Wenn zwei oder mehrere Kräfte nach derselben Richtung hin wirken, so ist ihre Resultirende gleich der Summe der einzelnen Kräfte. — Wenn zwei Kräfte gerade in entgegengesetzter Richtung auf einen Punkt einwirken, so ist die Resultirende gleich der Differenz der beiden und wirkt in der Richtung der größeren.

Wenn die Richtungen zweier Kräfte, welche auf einen materiellen Punkt wirken, einen Winkel mit einander machen, so findet man die Resultirende nach einem Gesetze, welches unter dem Namen des Parallelogramms der Kräfte bekannt ist. Man gelangt zu diesem Gesetz durch folgende einfache Betrachtung. Auf den Punkt *a* (Fig. 4) sollen zwei Kräfte gleichzeitig einwirken, die eine nach der Richtung *ax*, die andere nach der Richtung *ay*. Die eine Kraft mag von der Art seyn, daß sie für sich allein in einem bestimmten Zeittheilchen, etwa einer Sekunde, den Punkt von *a* nach *b* bewegen würde, während die andere für sich allein in einer gleichen Zeit ihn von *a* nach *c* treibt. Jede dieser beiden Kräfte thut ihre Wirkung vollständig, wenn also der Punkt eine Sekunde lang der gleichzeitigen Einwirkung beider Kräfte ausgesetzt ist, so ist die Wirkung offenbar dieselbe, als ob eine Sekunde lang der Punkt nur der Einwirkung der einen, in der folgenden Sekunde aber nur der Einwirkung der anderen Kraft unterworfen wäre. Die eine Kraft allein treibt den Punkt in einer Sekunde von *a* nach *b*. Hörte nun in dem Moment, in welchem er in *b* ankommt, alle Wirkung dieser Kraft auf, während der Punkt von nun an nur der Einwirkung der zweiten

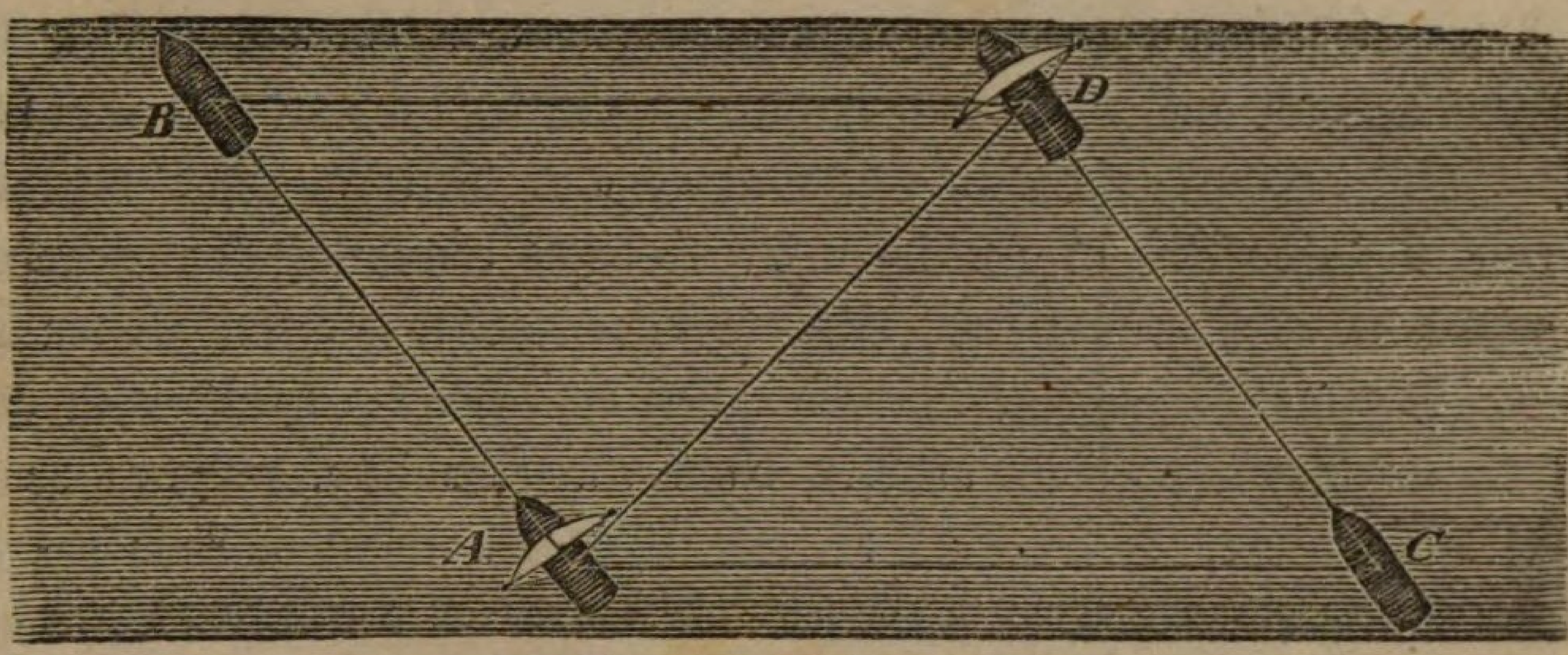
Fig. 4.



Kraft folgt, so würde er am Ende der folgenden Sekunde in *r* anlangen. In demselben Punkte *r* muß also auch der Punkt *a* nach einer Sekunde ankommen, wenn beide Kräfte gleichzeitig wirken.

Ein Beispiel wird es anschaulicher machen. Von dem Punkte *A* an dem Ufer eines Flusses fährt ein Schiff ab, auf welches gleichzeitig zwei Kräfte, der Strom und der Wind, einwirken. Nehmen wir an, das Schiff werde durch

Fig. 5.



den Wind allein in einer bestimmten Zeit, etwa in einer Viertelstunde, quer über den Fluß, von *A* nach *B*, getrieben, durch den Strom allein aber würde es, wenn gar kein Wind ginge, in derselben Zeit von *A* nach *C* gelangen, so muß es, wenn Strom und Wind gleichzeitig wirken, in einer Viertelstunde den Weg von *A* bis *D* zurücklegen, d. h. es muß nach einer Viertelstunde unter gleichzeitiger Wirkung beider Kräfte in demselben Punkte *D* ankommen, als ob eine Viertelstunde lang der Wind alleinwirkend das Schiff von *A* bis *B* getrieben hätte, und es alsdann in der folgenden Viertelstunde durch den Strom allein von *B* bis *D* geführt worden wäre.

Die Linie *ar*, Fig. 4, ist die Diagonale des Parallelogramms *abrc*; das durch unsere Betrachtung gefundene Gesetz kann demnach folgendermaßen ausgedrückt werden:

»Die Resultirende zweier Kräfte, welche gleichzeitig unter irgend einem Winkel auf einen materiellen Punkt einwirken, ist von der Art, daß sie den Punkt durch die Diagonale des Parallelogramms zu bewegen strebt, welches man aus den Bahnen construiren kann, welche jeder der Seitenkräfte entsprechen.«

Da die Bahn, welche ein Körper in einer gegebenen Zeit durchläuft, der Kraft proportional ist, welche ihn treibt, da es ferner bei Bestimmung der Resultirenden sich nur darum handelt, ihre Richtung und ihr Größenverhältniß zu den beiden Seitenkräften zu finden, so läßt sich das Gesetz auch so ausdrücken:

»Wenn man durch den Angriffspunkt zweier Kräfte zwei Linien in der Richtung derselben gezogen, und ihre Länge den resp. Kräften proportional gemacht denkt, so stellt die Diagonale des Parallelogramms, welches durch diese beiden Linien

bestimmt ist, sowohl der Größe als auch der Richtung nach die Resultirende der beiden Kräfte dar.«

Der Effect der beiden Seitenkräfte, welche auf den Punkt *a* wirken, wird aufgehoben, wenn man in *a* eine Kraft anbringt, welche der Resultirenden der beiden Seitenkräfte gleich und entgegengesetzt ist. Da zwischen drei Kräften Gleichgewicht stattfinden muß, wenn jede gleich und entgegengesetzt ist der Resultirenden der beiden anderen, so kann man das durch Schlüsse gefundene Gesetz des Parallelogramms der Kräfte auch leicht durch einen der Statik selbst angehörigen Versuch auf die Probe stellen. An einem Tischblatt (Fig. 6) sind zwei vertikale Stäbe angeschraubt, an jedem Stab aber ist eine Hülse verschiebbar, welche eine um ihre Axe in vertikaler Ebene leicht bewegliche Rolle trägt; die Stäbe müssen so angeschraubt seyn, daß die Vertikalebenen beider Rollen zusammenfallen. Schlingt man eine Schnur über die Rollen, hängt man an dem einen Ende ein Gewicht *a*, am anderen Ende ein Gewicht *c*, zwischen den Rollen ein Gewicht *b* an, so wird sich bei irgend einer bestimmten Lage der Fäden Alles in's Gleichgewicht stellen; man hat nun drei auf den Punkt *o* nach den Richtungen *op*, *oq* und *or* wirkende Kräfte, und es ist leicht zu prüfen, ob zwischen der Größe und Richtung derselben diejenigen Beziehungen wirklich stattfinden, wie sie das Gesetz des Parallelogramms der Kräfte verlangt.

Fig. 6.

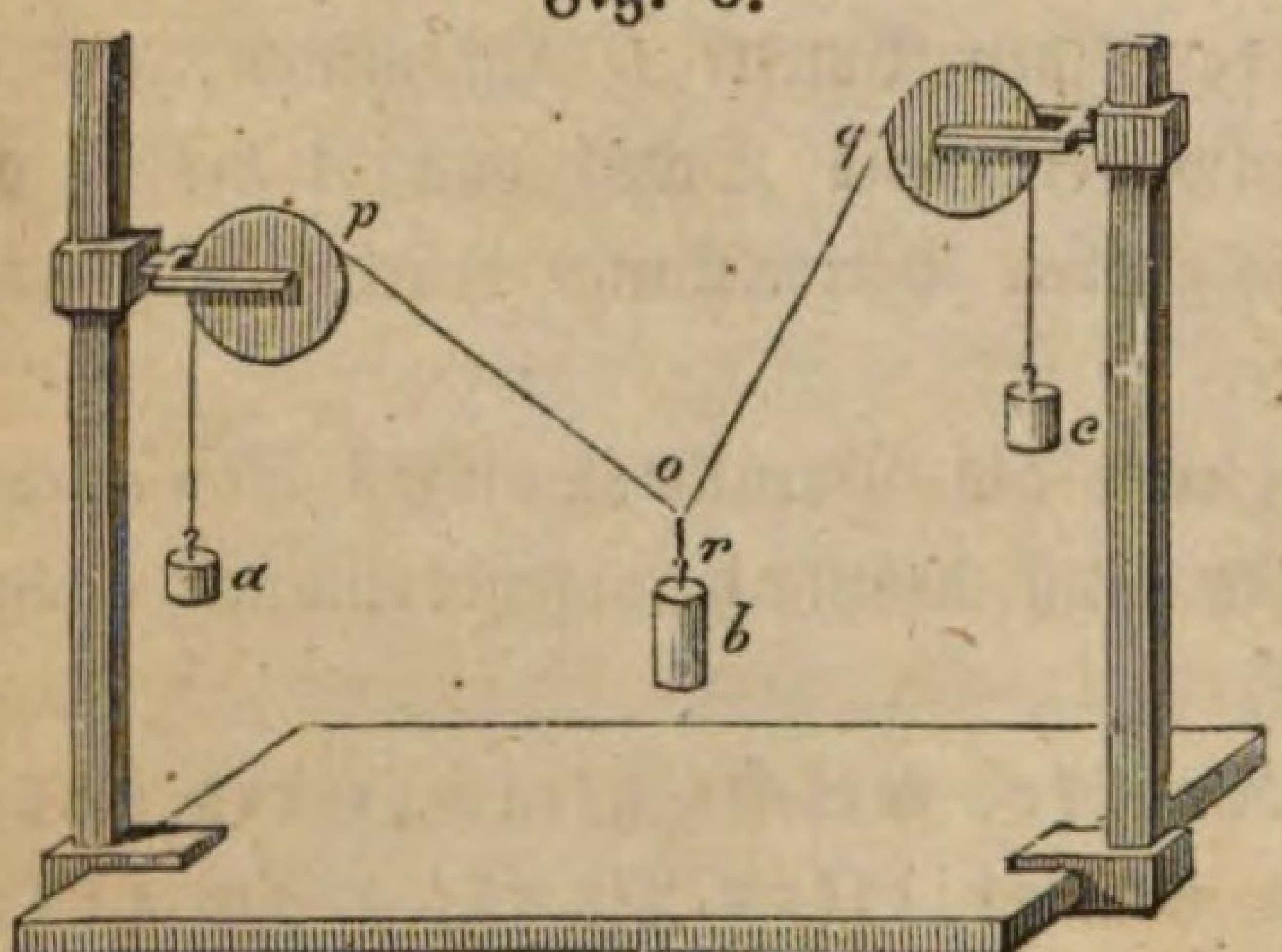
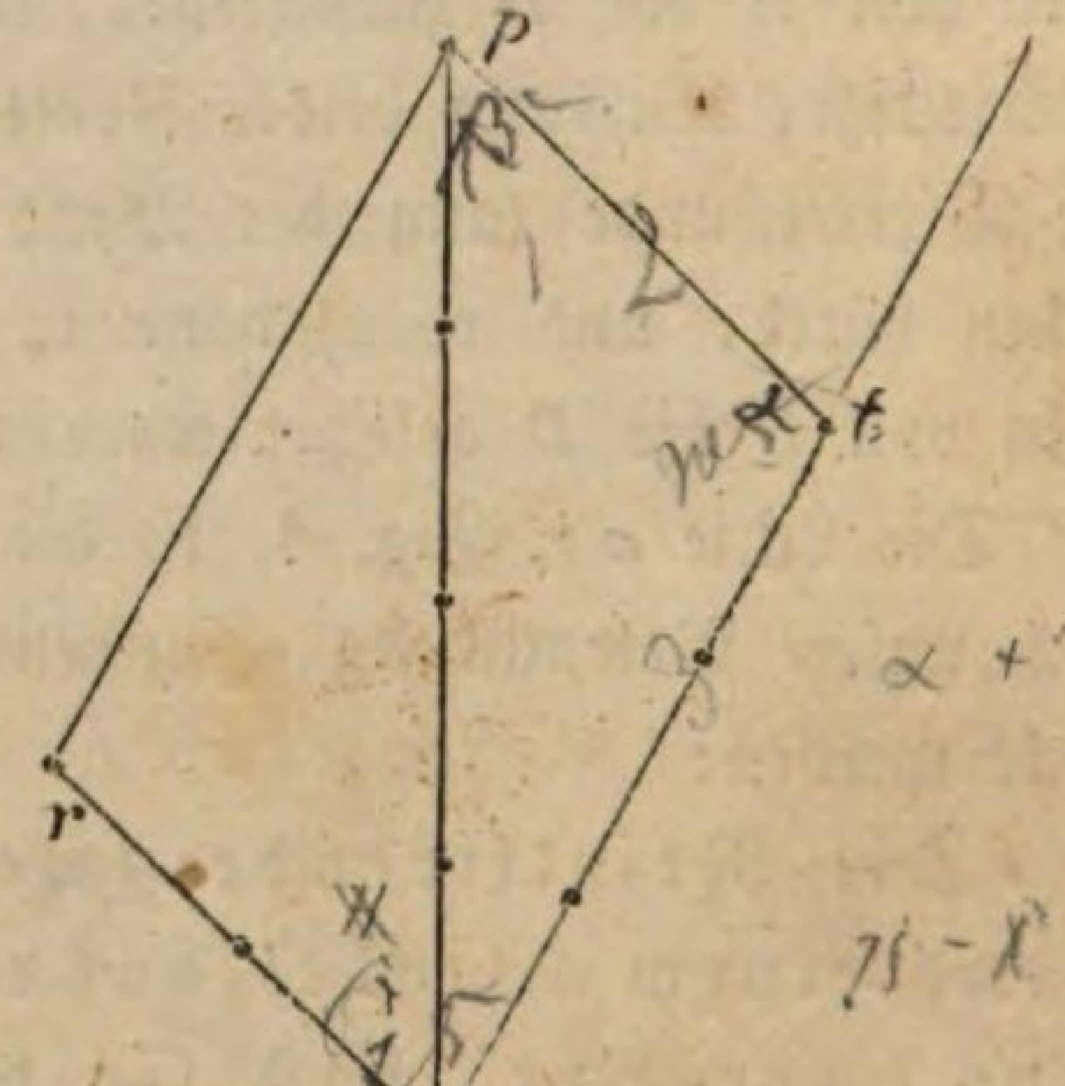


Fig. 7.



Es sey z. B. das Gewicht $a = 2$ Loth, $c = 3$ Loth; man fragt, wie groß muß die Kraft *b* seyn, wenn der Winkel *p o q* 75° seyn soll. Nach dem angeführten Gesetze kann man leicht die Resultirende durch Construction finden, wie es Fig. 7 geschehen ist. Wenn der Winkel *rst* gleich 75°, $rs = 2$, $st = 3$ (nach einer beliebigen Einheit) gemacht wird, so findet man, daß die Diagonale $sp = 4$ ist. Wenn also der Winkel $poq = 75°$ werden soll, so muß man das Gewicht *b* gleich 4 Lothen machen. Hat man ein Gewicht von 4 Lothen angehängt, so wird der Winkel *poq* der Schnüre aber wirklich 75°, wovon man sich leicht überzeugen kann, wenn man die in etwas großen Dimensionen ausgeführte Constructionsfigur hinter die Schnüre hält. Es fällt alsdann *rs* wirklich mit *op* und *st* mit *oq* zusammen.

Hätte man bei übrigens unveränderten Umständen *b* größer als 4 Loth gemacht, so würde der Winkel *p o q* kleiner geworden seyn als 75°. Je kleiner *b*, desto größer wird der Winkel *p o q* seyn müssen.

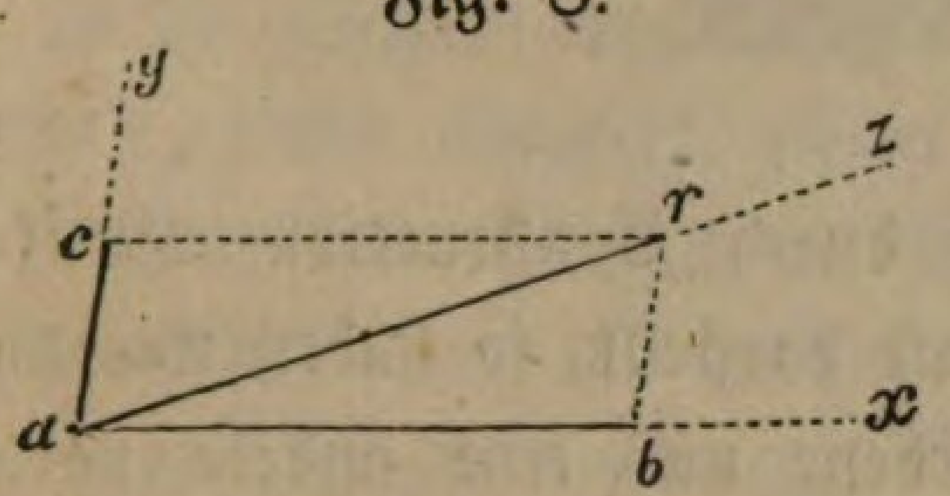
Wenn die beiden Seitenkräfte gleich sind, so theilt die Resultirende den Winkel, den sie mit einander machen, in zwei gleiche Theile.

Wenn die beiden Seitenkräfte ungleich sind, so theilt die Resultirende ihren Winkel nicht in gleiche Theile, sie liegt dann immer der größeren von beiden näher.

Da man die Resultirende zweier Kräfte, die auf einen Punkt wirken, finden kann, so findet man auch leicht die Resultirende einer beliebigen Anzahl von Kräften; man sucht nämlich nur die Resultirende der beiden ersten Kräfte, alsdann sucht man die Resultirende der eben gefundenen mit der dritten Kraft, verbindet diese Resultirende wieder mit der vierten Kraft u. s. w.

Weil zwei Kräfte durch eine einzige ersetzt werden können, so kann man umgekehrt für eine Kraft auch zwei andere substituiren. Man sieht ferner auch leicht ein, daß unzählig viele verschiedene Systeme von zwei Kräften dieselbe Resultirende haben können, daß also auch umgekehrt eine Kraft auf unzählig viele verschiedene Arten durch ein System von zwei Kräften ersetzt werden kann.

Fig. 8.

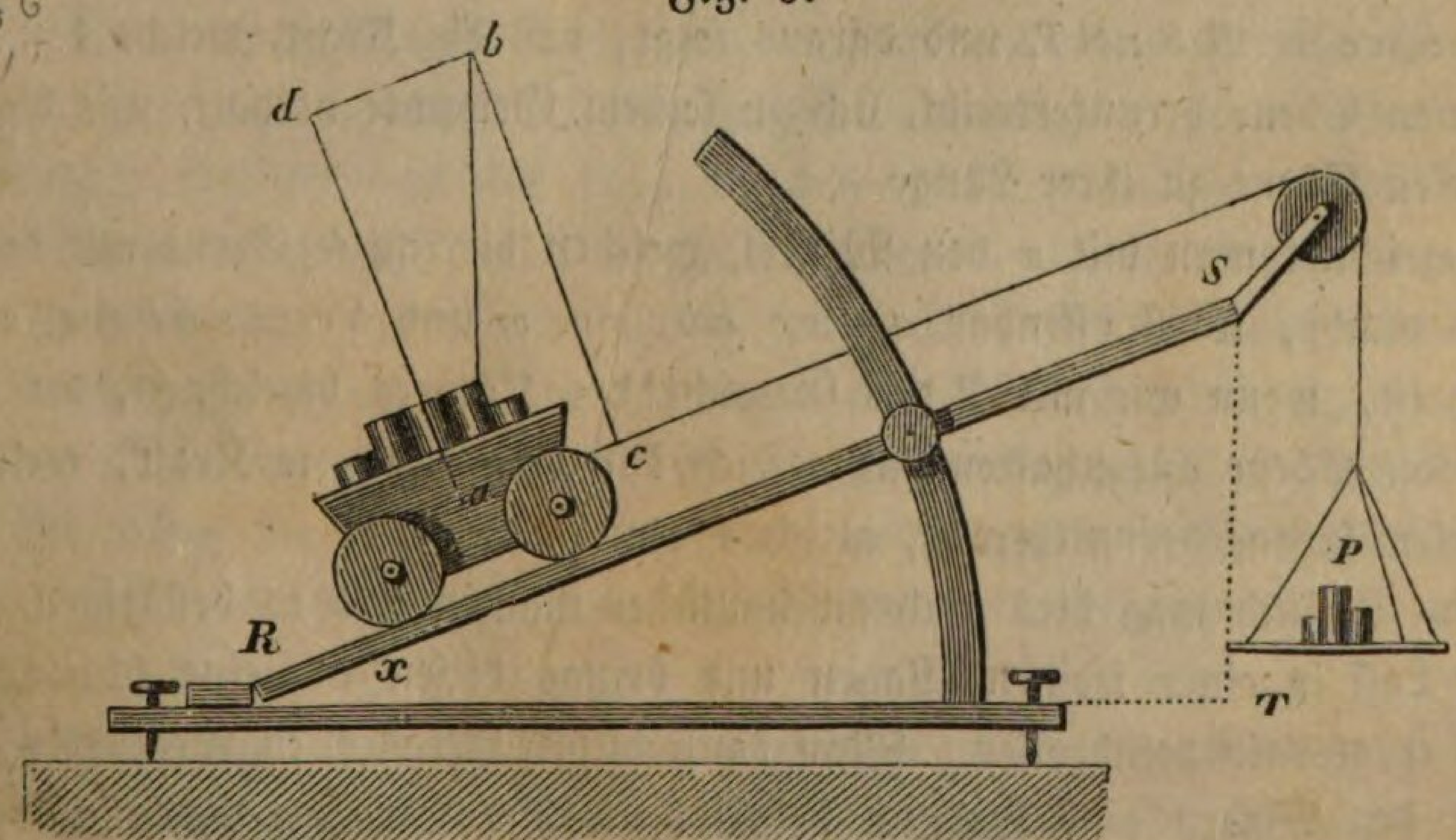


Wenn man aber z. B. verlangte, daß die Kraft *ar* Fig. 8 durch zwei andere ersetzt werden sollte, deren eine die Richtung *ay* und die Größe *ac* haben soll, so ist die Aufgabe vollkommen bestimmt, weil es jetzt nur noch eine Art giebt, das Parallelogramm zu vollenden und die Seitenkraft *ab* zu finden.

Aus dem Satze vom Parallelogramm der Kräfte lassen sich die Gesetze des Gleichgewichts an allen sogenannten einfachen Maschinen ableiten, die wir jetzt der Reihe nach betrachten wollen.

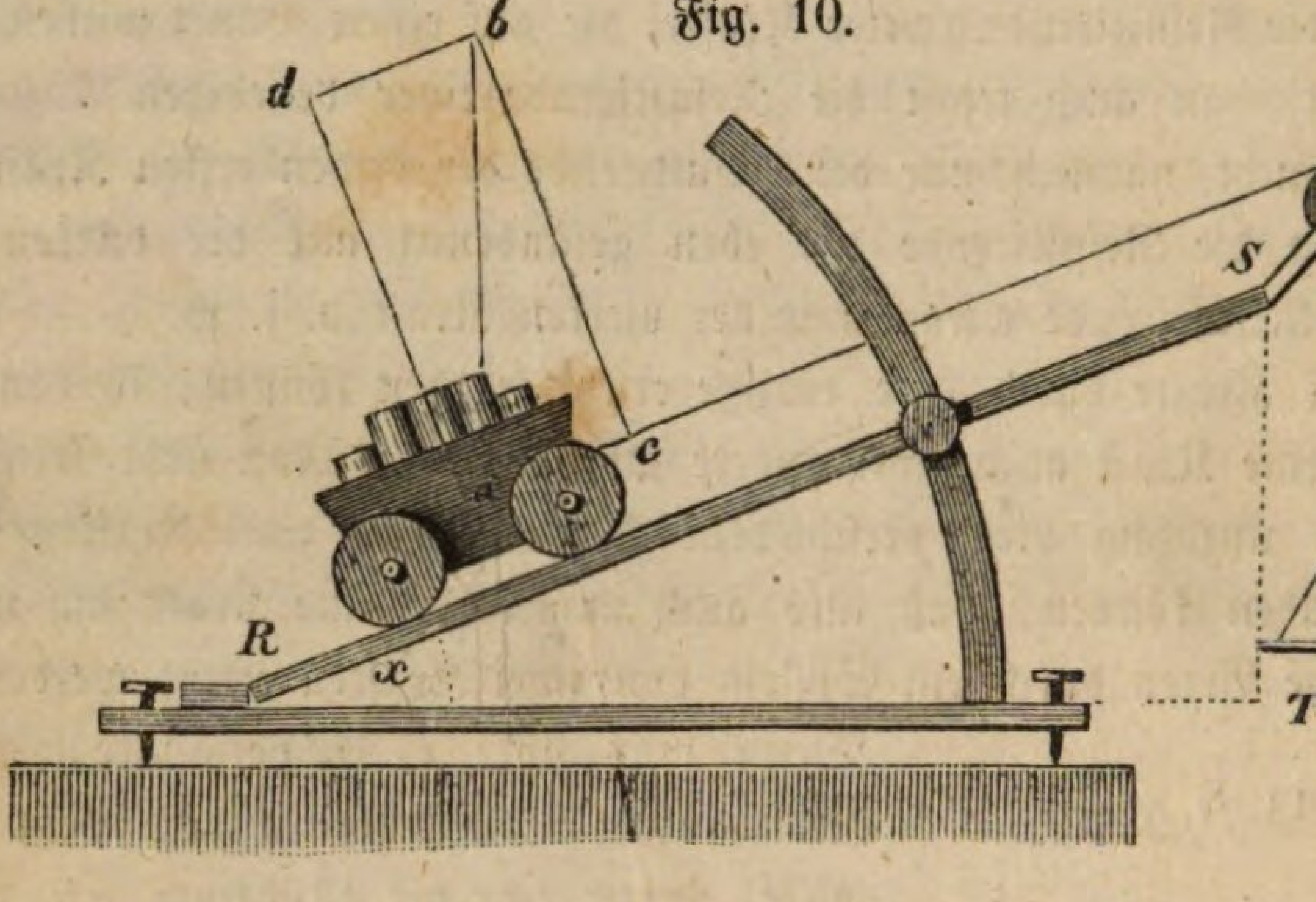
Die schiefe Ebene bietet uns ein praktisches Beispiel von der Zerle- 17
gung der Kräfte dar. Wenn eine Last auf einer Ebene sich befindet, welche mit

Fig. 9.



der horizontalen einen Winkel x bildet, so ist die nach der Richtung ab, Fig. 10, wirkende Schwere des Körpers nicht mehr rechtwinklig gegen die Ebene gerichtet, die Ebene hat also auch nicht den vollen Druck des Gewichtes der Last auszuhalten. In der That läßt sich die Schwere des Körpers in zwei andere Kräfte zerlegen, von denen die eine rechtwinklig gegen die Ebene als Druck wirkt, während die andere parallel mit der schiefen Ebene wirkend den Körper herabtreibt.

Fig. 10.



Die Größe dieser beiden Kräfte läßt sich leicht durch Construction ermitteln. Wenn ab die Größe und Richtung der Schwerkraft darstellt, so haben wir durch a nur eine Linie rechtwinklig zu der schiefen Ebene und eine andere parallel mit derselben zu ziehen, und sodann von b aus die Perpendikel bd und bc auf diese Linien zu fällen. Die Linie ad stellt uns die Größe des Drucks dar, welchen die Ebene auszuhalten hat, ac aber die Größe der Kraft, welche die Last zur schiefen Ebene heruntertreibt, oder mit anderen Worten, der Druck auf die Ebene und die Kraft, welche den Körper parallel der schiefen Ebene zu bewegen strebt, verhalten sich zum Gewicht des Körpers, wie die Linien ad und ac zu ab.

Nun aber ist das Dreieck abc dem Dreieck RST ähnlich und zwar verhält sich $ab : ac = RS : ST$, und daraus folgt, daß die Kraft, welche den Körper zur schiefen Ebene heruntertreibt, sich zu seinem Gewichte verhält, wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge.

Bezeichnet man mit x den Winkel, welchen die schiefe Ebene mit der horizontalen macht, so ist offenbar $ac = ab . \sin. x$ und $bc = ab \cos. x$, und demnach ist, wenn wir mit P das Gewicht des Körpers bezeichnen, der Druck, welchen die Ebene auszuhalten hat, gleich $P \cos. x$, und die Kraft, welche ihn zur schiefen Ebene heruntertreibt, gleich $P \sin. x$.

Ein Versuch mag dies noch anschaulicher machen und es bestätigen. Man lege die Last in einen kleinen Wagen und bringe diesen auf eine schiefe Ebene, so wird er alsbald herabrollen. Man kann dieses Herabrollen verhindern, wenn man an den Wagen eine Schnur befestigt, welche um eine Rolle geschlungen und an deren Ende ein Gewicht P hängt.

Gesetzt, der kleine Wagen mit der darin liegenden Last wiege 1000 Gramm, und der Winkel x sey 30^0. Für diesen Fall ist $ST = \frac{1}{2}\, RS$, also auch $ac = \frac{1}{2}\, ab$, d. h. die Kraft, welche den Wagen heruntertreibt, ist der Hälfte seines Gewichtes gleich, man wird also das Herabrollen verhindern können, wenn man das Gewicht $P = 500$ Gramm macht.

Wäre der Winkel $x = 19^0\ 13'$, so würde $ST = \frac{1}{3}\, RS$ seyn, und man dürfte das Gewicht P nur $^{1000}/_3 = 333$ Gramm machen, um das Herabrollen des Wagens zu verhindern.

Da sin. $14^0\ 13'$ sehr nahe gleich $\frac{1}{4}$ ist, d. h. da für den Winkel $x = 14^0 13'$ $ST = \frac{1}{4}\, RS$, so muß für diesen Fall $P = \frac{1}{4}\ 1000 = 250$ Gramm seyn.

Damit man den Versuch für verschiedene Neigungswinkel anstellen kann, wendet man als schiefe Ebene ein polirtes Brett an, welches mittelst eines Charniers auf einem andern horizontal stehenden Brette so befestigt ist, daß man ihm jede beliebige Lage geben kann. Die Rolle, um welche die Schnur geschlungen ist, kann an dem Brette befestigt seyn; man kann aber auch zu diesem Zweck leicht einen der Stäbe von Fig. 6 anwenden, da man ja die Hülse mit der Rolle nach Belieben am Stabe auf- und abschieben und so die Rolle in die Höhe bringen kann, in welcher man sie haben will. Statt das Gewicht P direct an die Schnur anzuhängen, befestigt man eine leichte Wagschale am Ende derselben, deren Gewicht genau ausgemittelt werden muß, und legt dann noch so viel Gewicht zu, daß die Wagschale mit den Gewichten so viel wiegt, als das berechnete P.

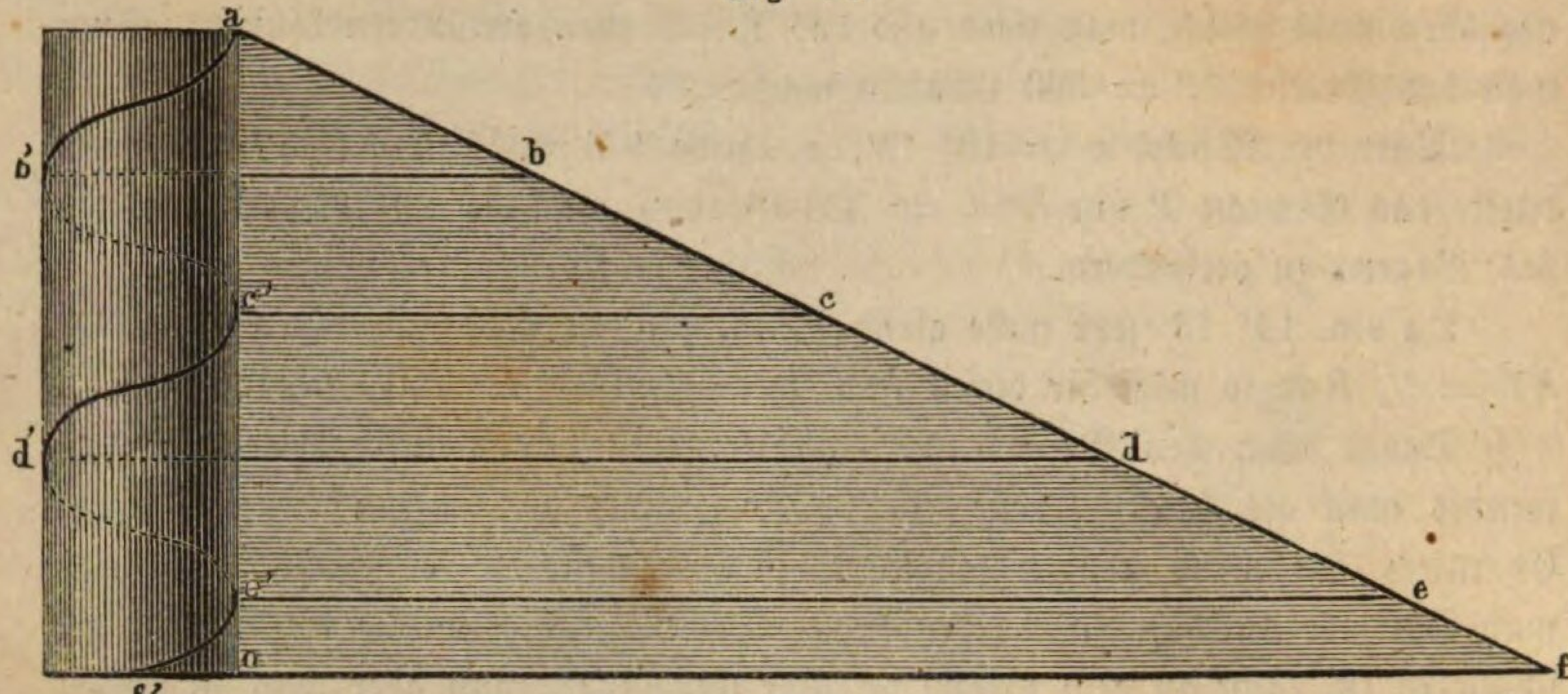
Praktische Anwendungen der schiefen Ebene kommen täglich vor. Jeder Weg, welcher einer Anhöhe hinaufführt, ist eine schiefe Ebene, auf welcher Lasten von dem Thal bis zum Gipfel gehoben werden; um z. B. einen Lastwagen auf einer geneigten Chaussee aufwärts zu ziehen, muß außer der Kraft, welche nöthig ist, um die Reibung zu überwinden, die gerade ebenso auch bei ganz horizontalen Wegen überwunden werden muß, noch eine Kraft angewandt werden, um dem mit der schiefen Ebene parallel wirkenden Antheil der Schwerkraft das Gleichgewicht zu halten. Dieser Antheil ist aber um so größer, je steiler der Weg ist. Aus diesem Grunde führt man an steilen Bergen die Chausseen nicht gerade aus, sondern man zieht es vor, große Umwege zu machen und den Weg in Windungen, die weniger steil sind, auf den Gipfel zu führen. Bei Bauten aller Art kommt es häufig vor, daß die Materialien auf schiefen Ebenen in die Höhe geschafft werden, ja häufig werden solche schiefe Ebenen auf besonders zu diesem Zwecke aufgeschlagenen Gerüsten angelegt. Diese Anwendung der schiefen Ebene war schon im grauen Alterthum bekannt, denn höchst wahrscheinlich bedienten sich ihrer die alten Aegyptier, um die ungeheuren Steinblöcke in die Höhe zu schaffen, welche sie zu ihren Pyramiden verwendeten.

Die Schraube ist eine um einen Cylinder herumgewundene schiefe Ebene. 18

Es sey aof, Fig. 11 a. f. S., ein rechtwinkliges Stück Papier, dessen vertikale Kathete an dem Cylinder befestigt ist. Wird nun das Papier um den

Cylinder herumgewickelt, so bildet die Hypotenuse *af* auf dem Cylinder eine Schraubenlinie, deren Lauf man in der Figur leicht verfolgen kann.

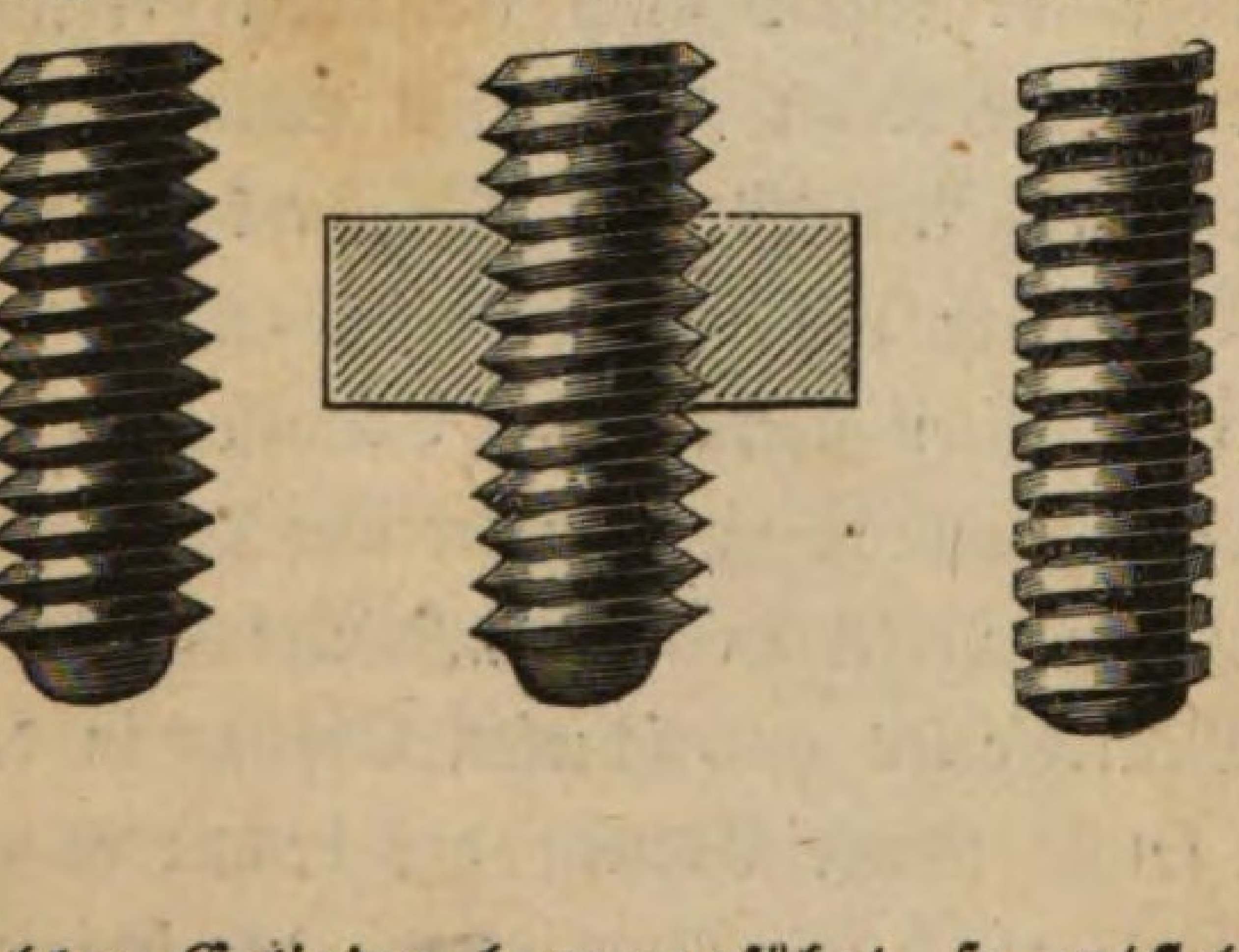
Fig. 11.



Ist *c' c* gleich dem Umfange des Cylinders, so wird beim Umwickeln *c* nach *c'* vertikal unter *a* kommen. Der Punkt *b* kommt nach *b'*, *d* nach *d'* u. s. w. Die auf die hintere Seite des Cylinders fallenden Stücke der Schraubenlinie sind punktirt. Die Höhe von *a* bis *c'*, von *b'* bis *d'* u. s. w. ist die Höhe eines Schraubenganges.

Denken wir uns an der Schraubenlinie um den Cylinder ein Dreieck fortgeführt, welches die Höhe eines Schraubenganges hat, so entsteht ein sogenanntes scharfes Schraubengewinde, wie ein solches in Fig. 12 dargestellt ist; denkt man sich aber ein Viereck, dessen Höhe gewöhnlich halb so groß ist als die Höhe eines Schraubenganges, auf dieselbe Weise um den Cylinder geführt, so entsteht ein flaches Schraubengewinde; ein solches ist Fig. 14 dargestellt.

Fig. 12. Fig. 13. Fig. 14.



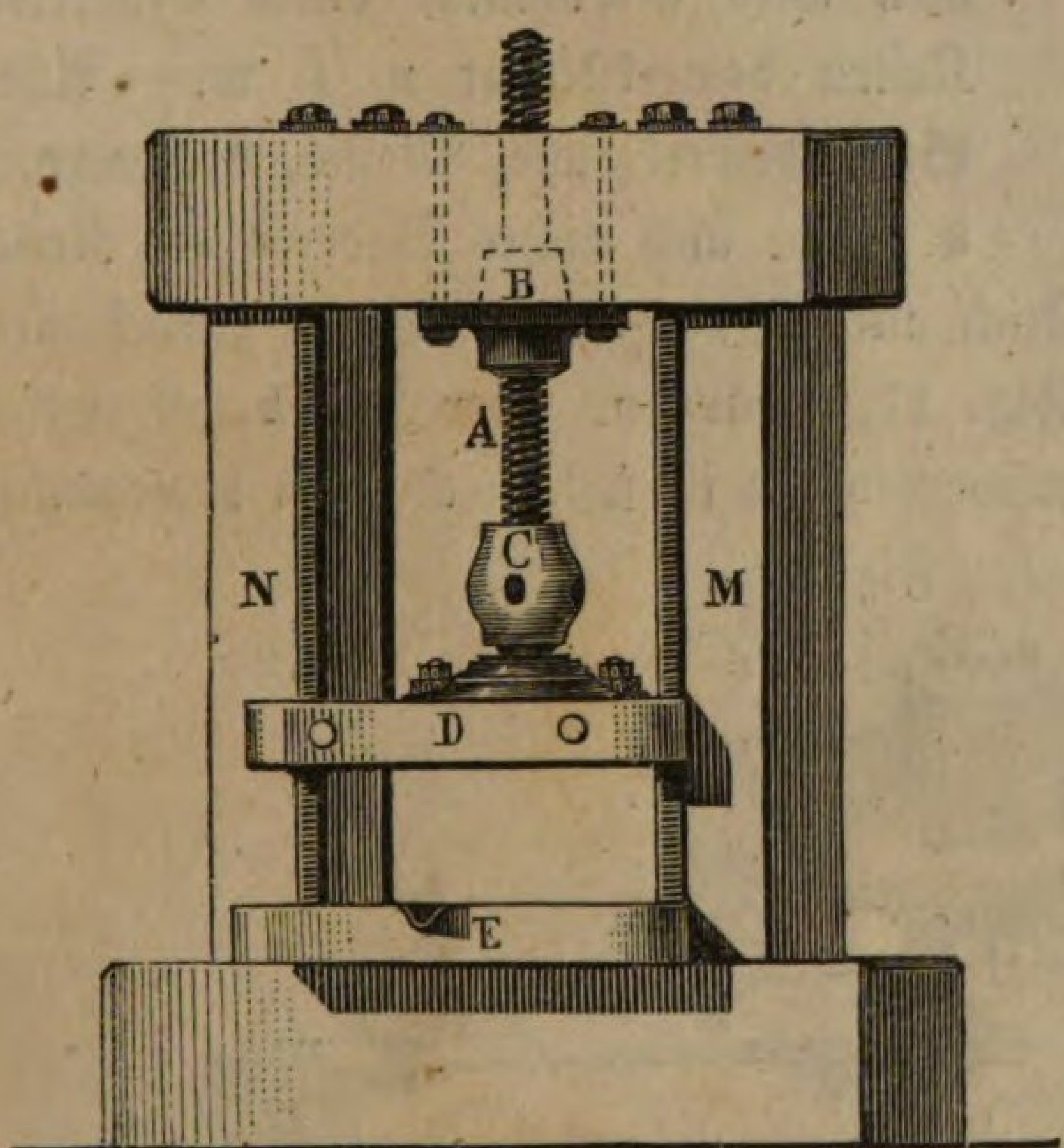
Wir haben bisher solche Schraubengewinde betrachtet, welche um einen soliden Cylinder herumgelegt sind; Schrauben, welche auf diese Weise gebildet sind, werden Schraubenspindeln genannt; werden aber die Gewinde auf dieselbe Weise um einen hohlen Cylinder herumgeführt, so entsteht eine Schraubenmutter.

Eine Schraubenspindel ist für sich allein zum Fortschieben oder Heben einer Last, oder um einen starken Druck auszuüben, nicht zu gebrauchen; sie muß mit einer Schraubenmutter so verbunden seyn, daß die Erhabenheiten der einen genau in die Vertiefungen der andern passen. Fig. 13 stellt eine Schraubenspindel in Verbindung mit der Mutter dar und zwar ist die Spindel ganz, die Mutter zur Hälfte durchgeschnitten gezeichnet. Denken wir uns die Schraubenspindel vertikal gestellt und die Schraubenmutter fest, so wird die Schrauben-

spindel bei jeder Umdrehung derselben um die Höhe eines Schraubenganges auf- oder niedergehen, indem die Windungen der Schraubenspindel auf den Windungen der Schraubenmutter wie auf einer schiefen Ebene auf- und niedergleiten. Sollte eine auf der Schraubenspindel liegende Last durch Umdrehung derselben gehoben werden, so ist klar, daß hier dieselben Principien gelten, wie bei einer schiefen Ebene von gleicher Steigung. Es wird sich also die (am Umfang der Spindel angebrachte) Kraft für den Fall des Gleichgewichts an der Schraube zur Last verhalten, wie die Höhe des Schraubenganges zum Umfang der Spindel, man wird also zur Hebung einer Last eine um so kleinere Kraft nöthig haben, je geringer die Höhe des Schraubenganges im Verhältniß zum Umfang der Spindel ist.

Die Schraubenpresse, Fig. 15, ist ein Beispiel von der Anwendung der Schraube. Eine Schraube *A* paßt in die feste Mutter *B*. Am untern Ende der Schraube *C* befindet sich eine Verstärkung *C* mit zwei zu einander rechtwinkligen durch und durch gehenden Löchern, welche zum Einstecken von Hebeln dienen, mittelst deren man die Schraube umdreht. — Der auf- oder niedergehenden Bewegung der Schraube folgt die Preßplatte *D*, ohne sich jedoch mit ihr zu drehen, was durch die Posten *M* und *N* verhindert wird. Auf die Platte *E* wird der auszupressende Körper gelegt, welcher natürlich mit großer Kraft zusammengedrückt wird, wenn man die Schraube in der entsprechenden Richtung dreht.

Fig. 15.



Auch zu andern Zwecken, als zur Ausübung eines großen Druckes wird die Schraube noch angewandt. Eine Schraube, welche in ihrer Längenrichtung nicht verschiebbar ist, wird eine bewegliche Schraubenmutter bei jeder Umdrehung um einen Schraubengang voranschieben; bei gleichförmiger Umdrehung der Schraube wird also auch die Mutter mit gleichmäßiger Geschwindigkeit fortgeschoben und zwar um so langsamer, je feiner das Gewinde ist. Darauf beruht der Gebrauch der sogenannten Mikrometerschraube bei Meßwerkzeugen, das gleichmäßige Fortschieben des Supports an Drehbänken u. s. w.

Um den Effect einer Schraube richtig zu berechnen, darf man die Reibung nicht außer Acht lassen, die hier eine große Rolle spielt, wie wir später noch sehen werden. Um aus der Schraube eine kräftige Maschine zu machen, läßt

man die Kraft, welche die Umdrehung bewirkt, nicht direct am Umfang der Schraube, sondern an einem größeren Hebelarm wirken, wie man dies an allen Schraubenpressen sehen kann.

Da bei einigermaßen feinen Schraubengängen selbst einer ganzen Umdrehung des Schraubenkopfes nur ein sehr geringes Fortschieben entspricht, so benutzt man bei Meßinstrumenten eine feine Schraube zur genaueren Einstellung. — Da man, wenn der Schraubenkopf einigermaßen groß und in Grade eingetheilt ist, noch den 360sten Theil einer ganzen Umdrehung messen kann, so ist man auch im Stande, vermittelst einer solchen Schraube noch ein Fortschieben um den 360sten Theil der ohnehin schon geringen Höhe eines Schraubenganges zu messen; eine feine Schraube kann also als Mikrometerschraube zur Hervorbringung und Messung sehr kleiner Längenverschiebungen angewendet werden. In dieser Weise benutzt man die Mikrometerschraube bei Mikroskopen zur Messung kleiner Gegenstände.

19 **Der Keil.** Eine andere Form, in welcher die schiefe Ebene zur Anwendung kommt, ist der Keil; er wird gebraucht, um Holz- und Steinmassen zu spalten, Fig. 16; dadurch, daß man Keile unter die Kiele der Schiffe treibt, werden sie auf den Werften gehoben; das Auspressen des Oels aus dem zerriebenen Samen wird gewöhnlich durch Eintreiben von Keilen bewerkstelligt u. s. w. Alle unsere Schneidewerkzeuge, Messer, Scheeren, Meißel u. s. w. sind nichts Anderes als Keile. Daß die Wirkung des Keils sich wirklich auf die der schiefen Ebene zurückführen läßt, kann man durch den Apparat, Fig. 17, erläutern. Der Keil *k* soll zwischen den Rollen *a* und *b* hindurchgezogen werden. *a* ist fest, *b* an dem beweglichen Brett

Fig. 16.

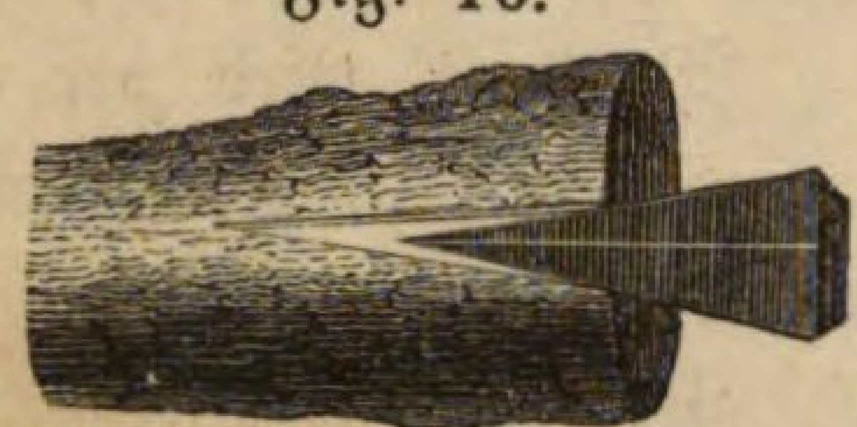
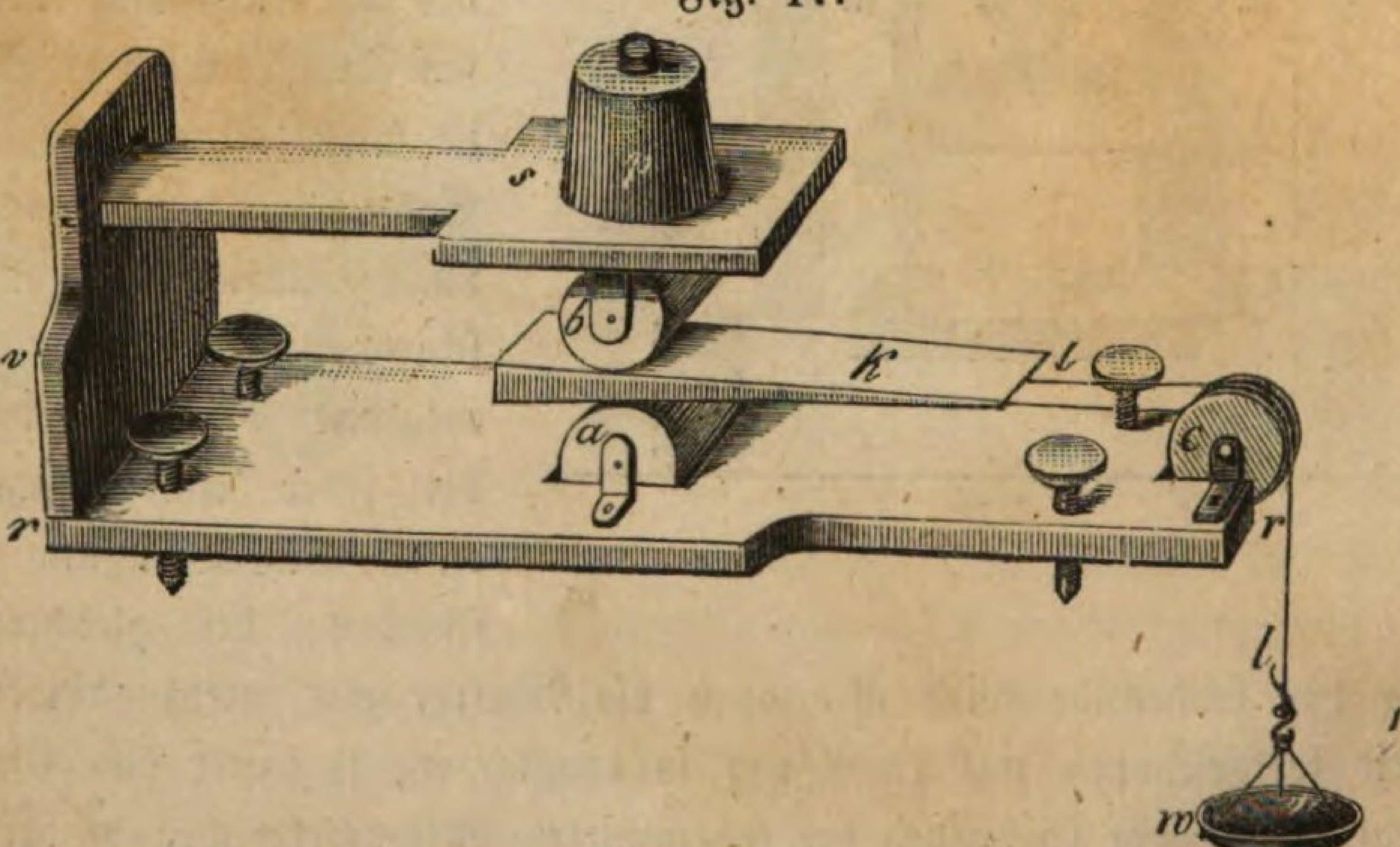


Fig. 17.



s befestigt. Auf *s* liegt ein Gewicht; mit einer kleinen Kraft, welche in der Wagschale *w* liegend den Keil nach der Rechten zieht, kann man eine verhältnißmäßig große Last heben, und zwar eine um so größere, je schmäler der Rücken des Keils im Vergleich zu seiner Länge ist.

Aus der Theorie der schiefen Ebene läßt sich leicht ableiten, daß zwischen der Kraft Q und der Last P am Keil Gleichgewicht stattfindet, wenn

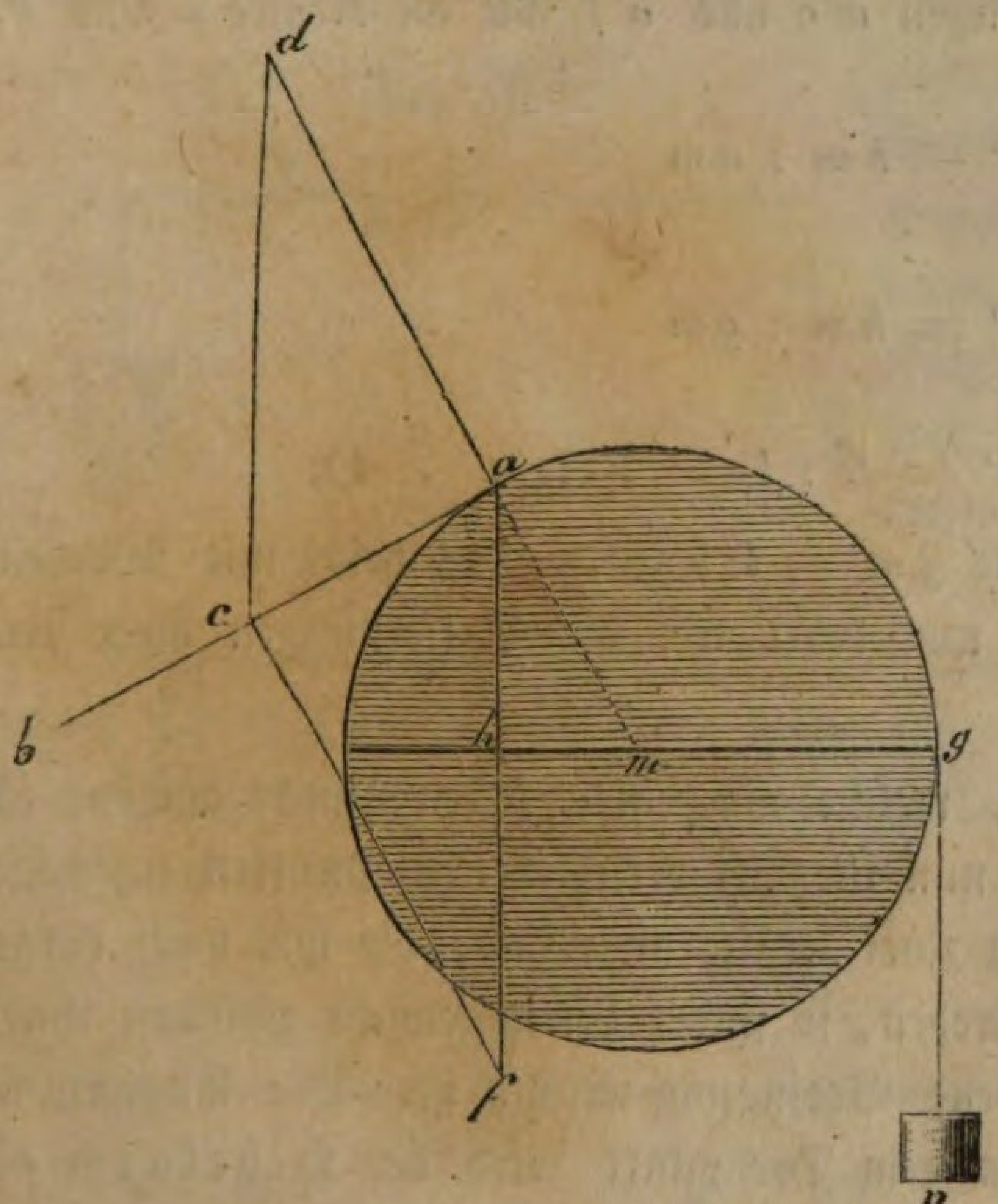
$$P = Q \sin. \alpha,$$

vorausgesetzt, daß die Last P rechtwinklig auf die Seitenfläche, die Kraft Q rechtwinklig gegen den Rücken wirkt und daß mit α der Winkel der Schneide bezeichnet wird.

Wenn der Winkel α nicht so groß ist, läßt sich das Gesetz des Gleichgewichts am Keil in Worten auch so ausdrücken: Eine Kraft Q, welche rechtwinklig gegen den Rücken des Keils wirkt, hält einem rechtwinklig gegen die Seite des Keils wirkenden Druck P das Gleichgewicht, wenn sich Q zu P verhält, wie die Breite des Keilrückens zur Länge des Keils.

Der Hebel. Um eine Rolle sey eine Schnur geschlungen und an dem 20
einen Ende derselben ein Gewicht p gehängt, während auf der anderen Seite die Schnur in der Richtung ab mit einer dem Gewichte p gleichen Kraft gespannt ist, Fig. 18. Nun aber kann man die in a angreifende, in der Richtung ab wirkende Kraft nach der Lehre vom Parallelogramm der Kräfte in zwei Seitenkräfte zerlegen, von denen die eine in der Richtung von a nach d, also in der Verlängerung des Halbmessers ma wirkt, während die Richtung af der anderen Seitenkraft parallel mit gp ist.

Fig. 18.

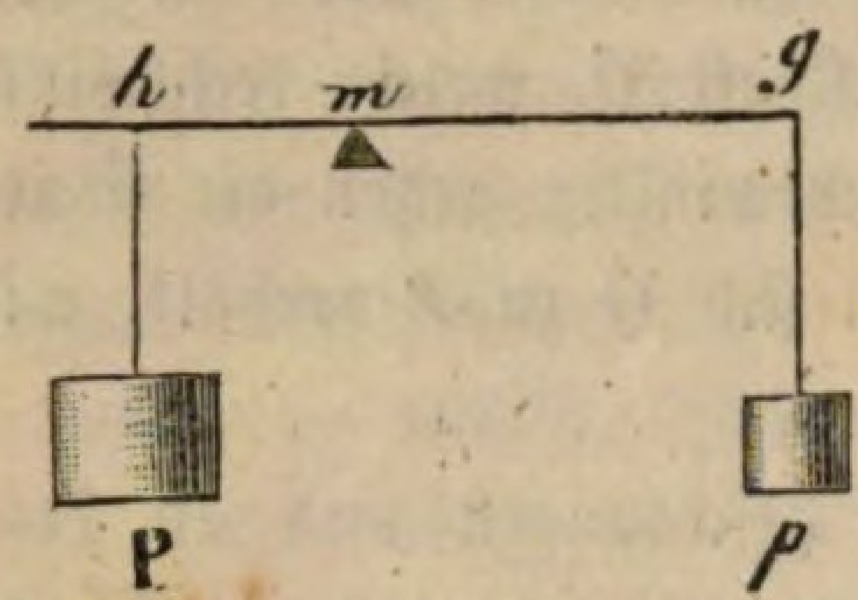


Wenn die Rolle eine feste ist, wie wir hier voraussetzen, so wird die Wirkung der Kraft ad durch den Widerstand des festen Mittelpunkts m aufgehoben, man kann also die nach ad wirkende Seitenkraft ganz weglassen, ohne das Gleichgewicht zu stören, man kann also ohne Weiteres die nach ab wirkende Kraft durch ihre nach af wirkende Seitenkraft ersetzen.

Stellen wir durch die Linie ac die nach ab wirkende Kraft p dar, so stellt uns die Linie af die Größe der Seitenkraft P dar, und ohne vor der Hand das Größenverhältniß zwischen ac und af oder p und P genauer zu ermitteln, sieht man doch leicht ein, daß P größer seyn muß als p. Wir können also die in der Richtung ab wirkende Kraft p durch eine andere ebenfalls in a angreifende, aber in vertikaler Richtung wirkende größere Kraft P ersetzen, ohne das Gleichgewicht zu stören.

Anstatt die Kraft P in a angreifen zu lassen, kann man, ohne das Gleichgewicht zu stören, ihren Angriffspunkt in jeden beliebigen Punkt der Linie af verlegen, wir können also auch die Kraft P im Punkte h angreifen lassen, welcher auf dem Durchschnitt der Linie af und der Verlängerung des Halbmessers gm liegt, und somit haben wir zwei an den Enden einer um m, Fig. 19, drehbaren geraden Linie hg wirkende, rechtwinklig zu hg angreifende Kräfte, p und P, welche sich das Gleichgewicht halten. Diese beiden Kräfte sind ungleich, ihre Angriffspunkte h und g liegen aber auch in ungleichen Entfernungen vom Drehpunkte m.

Fig. 19.



Es ist jetzt zu ermitteln, welches Verhältniß zwischen den Größen der Kräften p und P und den Längen hm und gm besteht.

Die Dreiecke caf, Fig. 18, und ahm sind einander ähnlich und daraus folgt

$$ac : af = hm : am.$$

Nun aber verhalten sich ja die Längen ac und af wie die Kräfte p und P, wir haben also

$$p : P = hm : am$$

und da $am = gm$,

$$p : P = hm : gm$$

oder

$$p : P = L : l \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1),$$

wenn wir die Länge $hm = L$ und $gm = l$ setzen. Das heißt mit Worten, die Kräfte P und p verhalten sich umgekehrt wie die Entfernungen ihrer Angriffspunkte vom Drehpunkte m.

Eine gerade unbiegsame Linie, welche um einen festen Punkt drehbar ist, wird ein **Hebel** genannt. Wenn nun in zwei verschiedenen Punkten eines Hebels rechtwinklig zu seiner Richtung zwei Kräfte angreifen, die ihn nach entgegengesetzten Richtungen zu drehen streben, so findet Gleichgewicht zwischen ihnen Statt, wenn die eben ausgesprochene Bedingung erfüllt ist. Die Entfernung des Angriffspunktes einer Kraft von dem Drehpunkt wird der **Hebelarm** der Kraft genannt, wir können demnach die Bedingung des Gleichgewichts am Hebel auch so ausdrücken: Zwei Kräfte, welche den Hebel nach entgegengesetzten Seiten zu drehen streben, halten sich das Gleichgewicht, wenn sie den entsprechenden Hebelarmen umgekehrt proportional sind.

Wäre z. B. der Hebelarm hm in Fig. 19 halb so groß als gm, so müßte P doppelt so groß seyn als p. Eine Kraft p kann an einem Hebel einer 100fachen Kraft P das Gleichgewicht halten, wenn nur der Hebelarm mg auch 100 mal so groß ist als der Hebelarm hm.

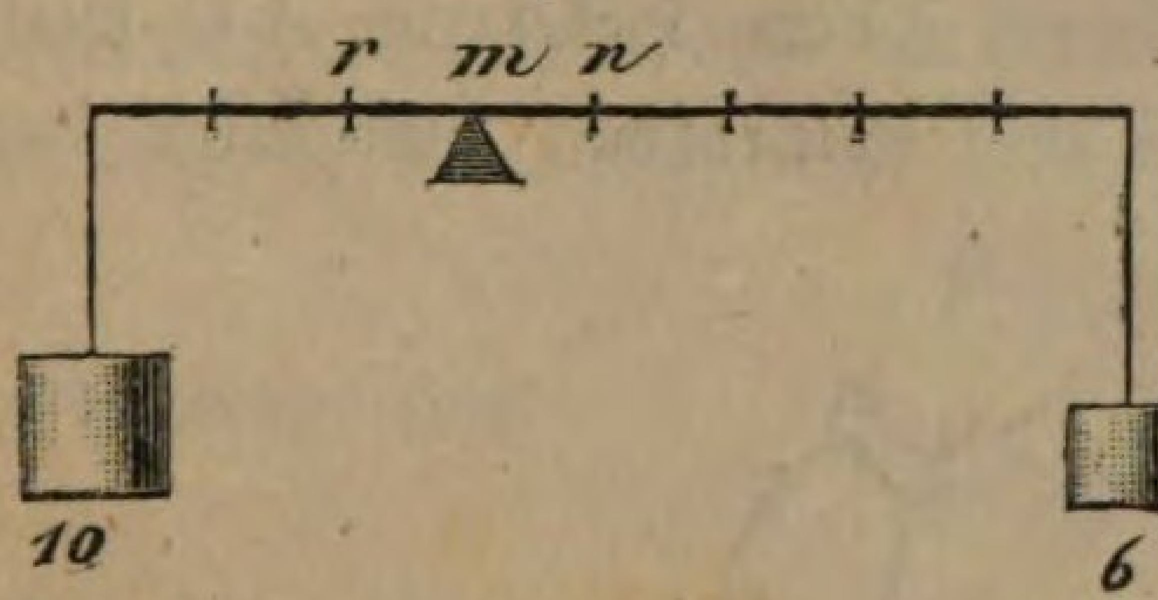
Aus der Proportion bei 1) folgt $PL = pl$, d. h. wenn sich zwei Kräfte an einem Hebel das Gleichgewicht halten sollen, so muß das Product, welches

man erhält, wenn man die Kraft mit ihrem Hebelarm multiplicirt, für die beiden Kräfte gleich seyn. Wäre z. B. die eine Kraft $p = 6$ Loth, ihr Hebelarm 12″, so müßte man, um dieser Kraft das Gleichgewicht zu halten, auf der anderen Seite an einem dreimal kleineren Hebelarm $^{12}/_{3}$ oder 4″ eine dreimal größere Kraft $3 \cdot 6 = 18$ Loth wirken lassen; offenbar aber ist das Product 6.12 dem Producte 4 . 18 gleich.

Das Product, welches man erhält, wenn man eine an einem Hebel wirkende Kraft mit ihrem Hebelarm multiplicirt, wird das **statische Moment** der Kraft genannt. Man könnte auch sagen, das **statische Moment** einer Kraft ist diejenige Kraft, welche man statt ihrer an den Hebelarm 1 anbringen muß, wenn durch diese Vertauschung der Gleichgewichtszustand nicht gestört werden soll.

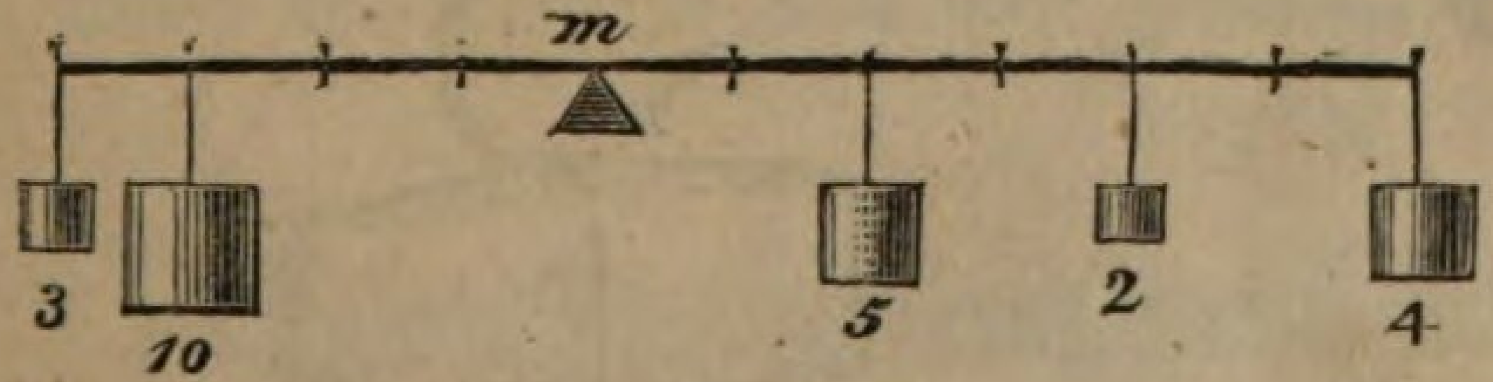
In Fig. 20 sey die Kraft rechts = 6, ihr Hebelarm = 5, so ist, das statische Moment dieser Kraft gleich $5 \times 6 = 30$: soll ihr die Kraft links das Gleichgewicht halten, so muß das statische Moment beider gleich seyn, die an dem Hebelarm 3 auf der linken Seite wirkende Kraft muß also den Werth 10 haben. Anstatt die Kraft 6 an den Hebelarm 5 wirken zu lassen, könnte man aber, ohne das Gleichgewicht zu stören, die Kraft 30 im Punkte *n*, also an dem Hebelarm 1 anbringen. Die auf der anderen Seite an dem Hebelarm 3 wirkende Kraft 10 kann man aber durch eine im Punkte *r*, also ebenfalls am Hebelarm 1 wirkende Kraft 30 ersetzen.

Fig. 20.



Wenn auf jeder Seite des Drehpunktes nicht eine, sondern mehrere Kräfte wirken, so findet Gleichgewicht Statt, wenn die Summe der statischen Momente auf der einen gleich ist der Summe der statischen Momente auf der anderen Seite. Es sey z. B. in Fig. 21 *m* der Drehpunkt, auf der einen Seite wirke an dem Hebelarm 2 die Kraft 5, am Hebelarm 4 die Kraft 2, am Hebelarm 6 die Kraft 4; auf der anderen Seite aber die Kräfte 10 und 3 an den Hebelarmen 3 und 4, so wird zwischen allen diesen Kräften Gleichgewicht stattfinden, denn die Summe der statischen Momente ist auf beiden Seiten gleich.

Fig. 21.



Die Summe der statischen Momente auf der einen Seite ist $5 \cdot 2 + 2 \cdot 4 + 4 \cdot 6 = 42$; die Summe der statischen Momente auf der anderen Seite aber ist $10 \cdot 3 + 3 \cdot 4$, also ebenfalls gleich 42. Statt der Kraft 5, welche in der Entfernung 2 vom Hebelarm angreift, konnte man die Kraft 10 in der Entfernung 1 anbringen; ebenso kann man die in den Entfernungen 4 und 6 wirkenden Kräfte 2 und 4 durch zwei andere am Hebelarm 1 angreifende Kräfte

8 und 24 ersetzen. Statt der drei in den Entfernungen 2, 4 und 6 wirkenden Kräfte 5, 2 und 4 kann man also die drei in der Entfernung 1 wirkenden Kräfte 10, 8 und 24 substituiren, oder mit anderen Worten, man kann die drei an verschiedenen Hebelarmen angreifenden Kräfte 5, 2, 4, durch eine einzige am Hebelarm 1 angreifende Kraft 42 ersetzen. Ebenso kann man aber die auf der anderen Seite in den Entfernungen 3 und 4 angreifenden Kräfte 10 und 3 durch zwei andere am Hebelarm 1 wirkende Kräfte 30 und 12 oder durch eine einzige am Hebelarm 1 wirkende Kraft 42 ersetzen; die Summe der statischen Momente ist auf beiden Seiten gleich, es muß also Gleichgewicht stattfinden.

Fig. 22.

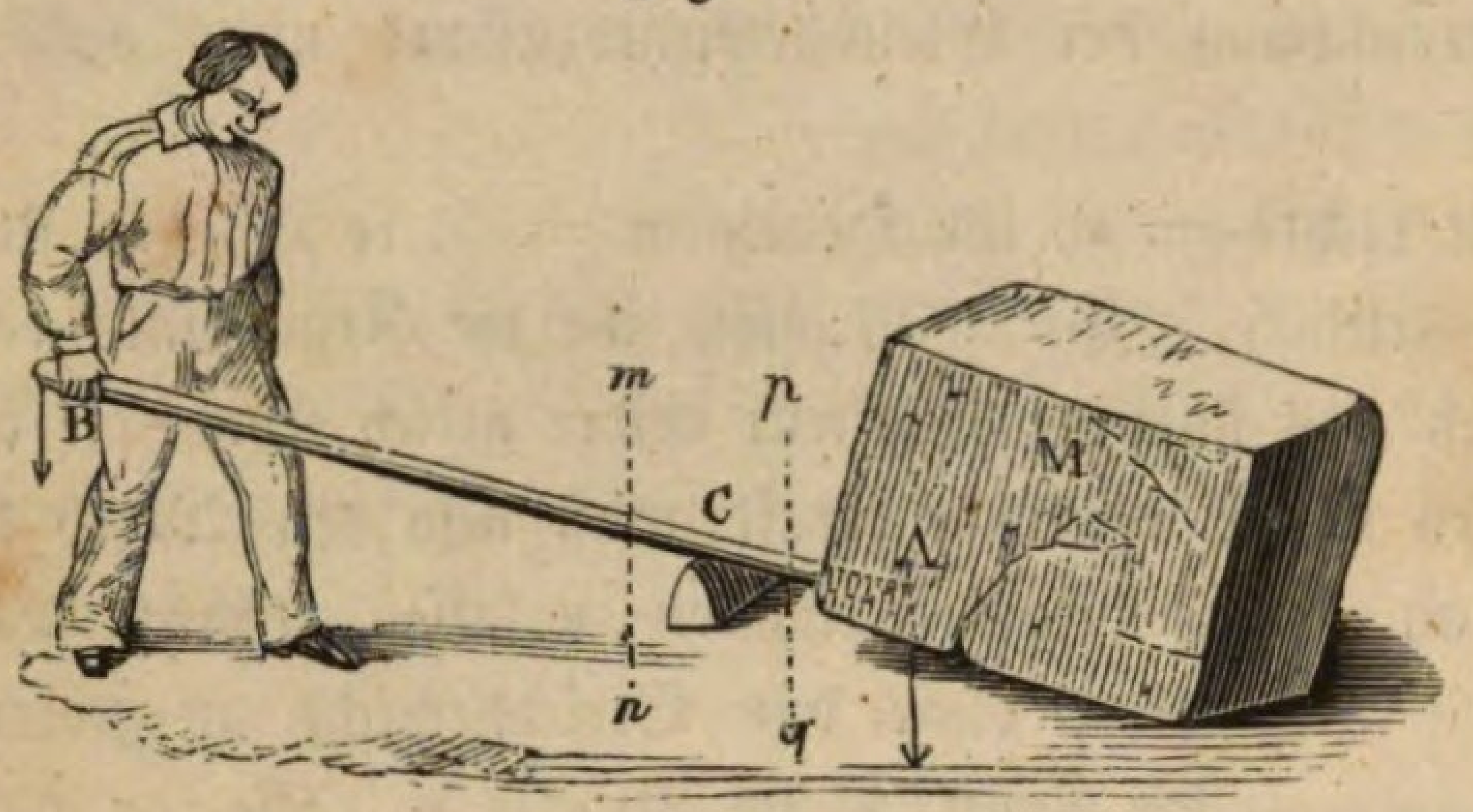
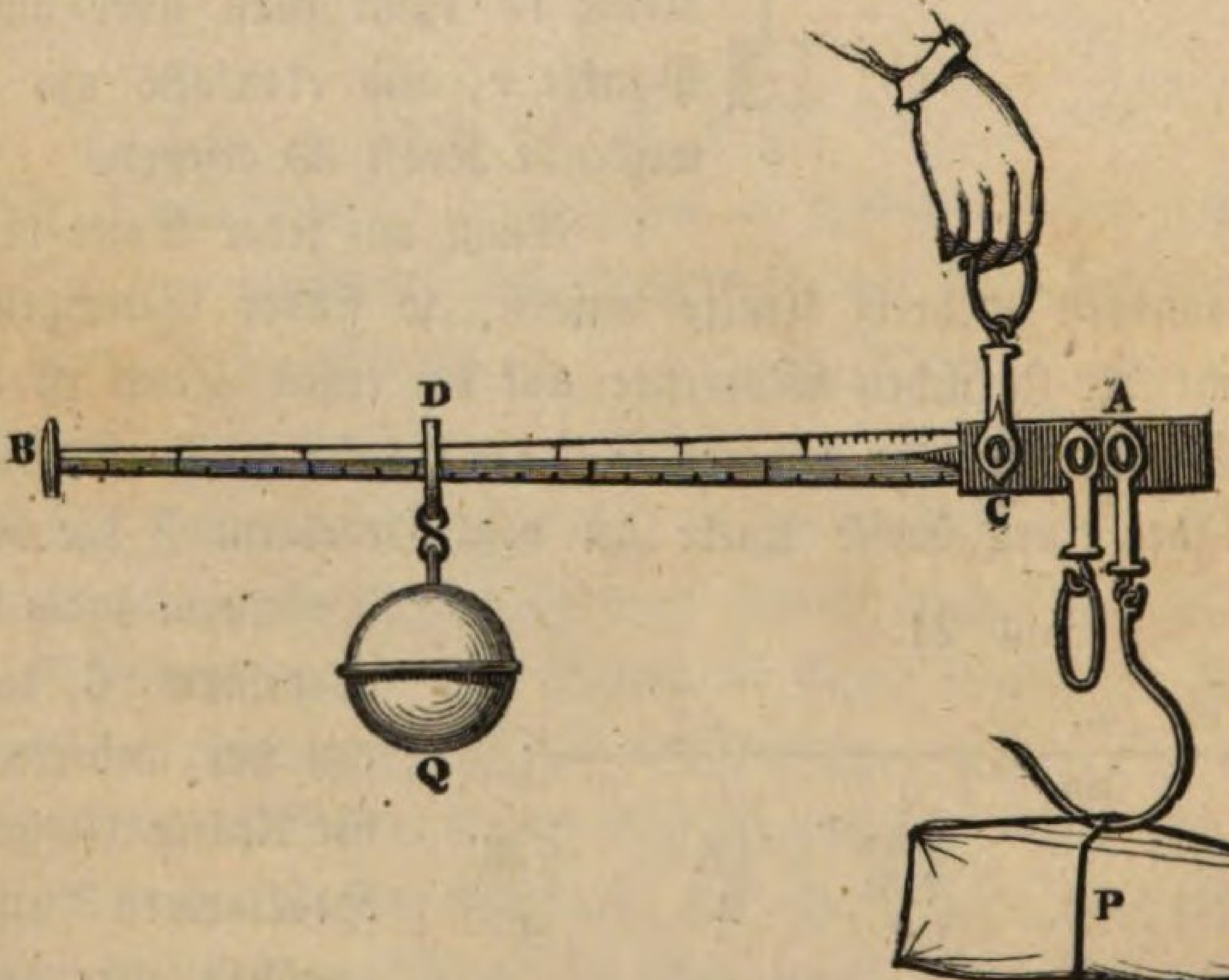


Fig. 22 erläutert eine allgemeine Art der Anwendung des zweiarmigen Hebels. Ein anderes Beispiel liefert uns die gewöhnliche Schnellwage, Fig. 23. Ein zweiarmiger Hebel ist bei *C* drehbar, bei *A* ist die Last *P* angehängt, die also an dem Hebelarm *A C* wirkt; dieser Last nun wird durch

Fig. 23.

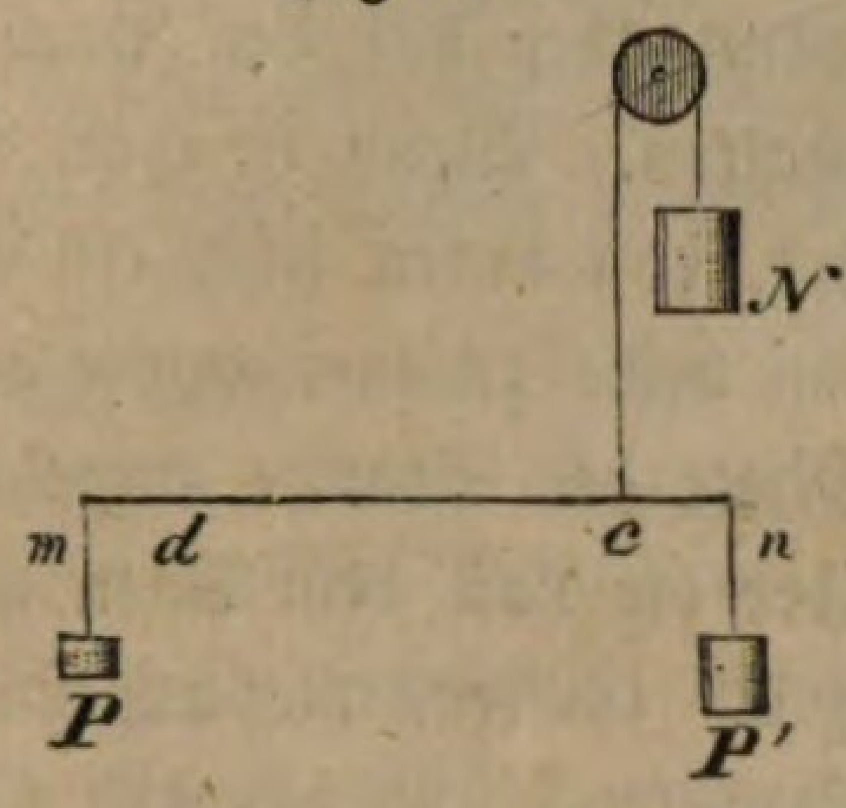


ein am anderen Arm des Hebels angehängtes Laufgewicht das Gleichgewicht gehalten. Je größer die Last wird, desto mehr muß man das Laufgewicht *Q* vom Drehpunkt *C* entfernen.

An einem solchen Hebel, wie wir ihn bisher betrachtet haben, hat der feste Drehpunkt einen Druck auszuhalten, welcher der Summe der an beiden Seiten wirkenden Kräfte gleich ist; ein solcher Hebel kann also auch im Gleichgewicht seyn, wenn dieser mittlere Punkt nicht fest ist, sondern wenn in ihm eine Kraft wirkt, welche der Summe der beiden anderen gleich ist, aber in entgegengesetzter

Richtung wirkt. Die Fig. 24 mag dies erläutern. Nehmen wir an, c sey der feste Drehpunkt eines Hebels mn, an dessen Enden die Kräfte P und P' angreifen und sich einander das Gleichgewicht halten. Dieses Gleichgewicht wird nun nicht gestört, wenn der Punkt c aufhört fest zu seyn, wenn in ihm aber eine Kraft N angebracht wird, welche der Summe von P und P' gleich ist, die aber nach oben wirkt, während die Kräfte P und P' nach unten ziehen.

Fig. 24.



Ohne das Gleichgewicht zu stören, kann man jeden der drei Punkte m, c und n als fest betrachten; wenn nun einer der beiden äußeren Punkte, etwa n, fest ist, so haben wir einen **einarmigen Hebel**, d. h. einen solchen, bei welchem die Angriffspunkte der beiden sich das Gleichgewicht haltenden Kräfte N und P auf derselben Seite des festen Drehpunktes n liegen. Die beiden Kräfte haben in diesem Falle entgegengesetzte Richtung, und der Druck auf den Unterstützungspunkt ist dem Unterschiede der beiden Kräfte P und N gleich. Der Hebelarm der Kraft P ist $l + l'$, wenn man mit l die Länge $m\,c$, mit l' die Länge $n\,c$ bezeichnet; der Hebelarm der Kraft N ist aber l'. Wäre c der feste Drehpunkt gewesen, so hätte man nach dem Obigen als Bedingung des Gleichgewichts

$$P' : P = l : l'$$

und daraus folgt

$$P' + P : P = l + l' : l'$$

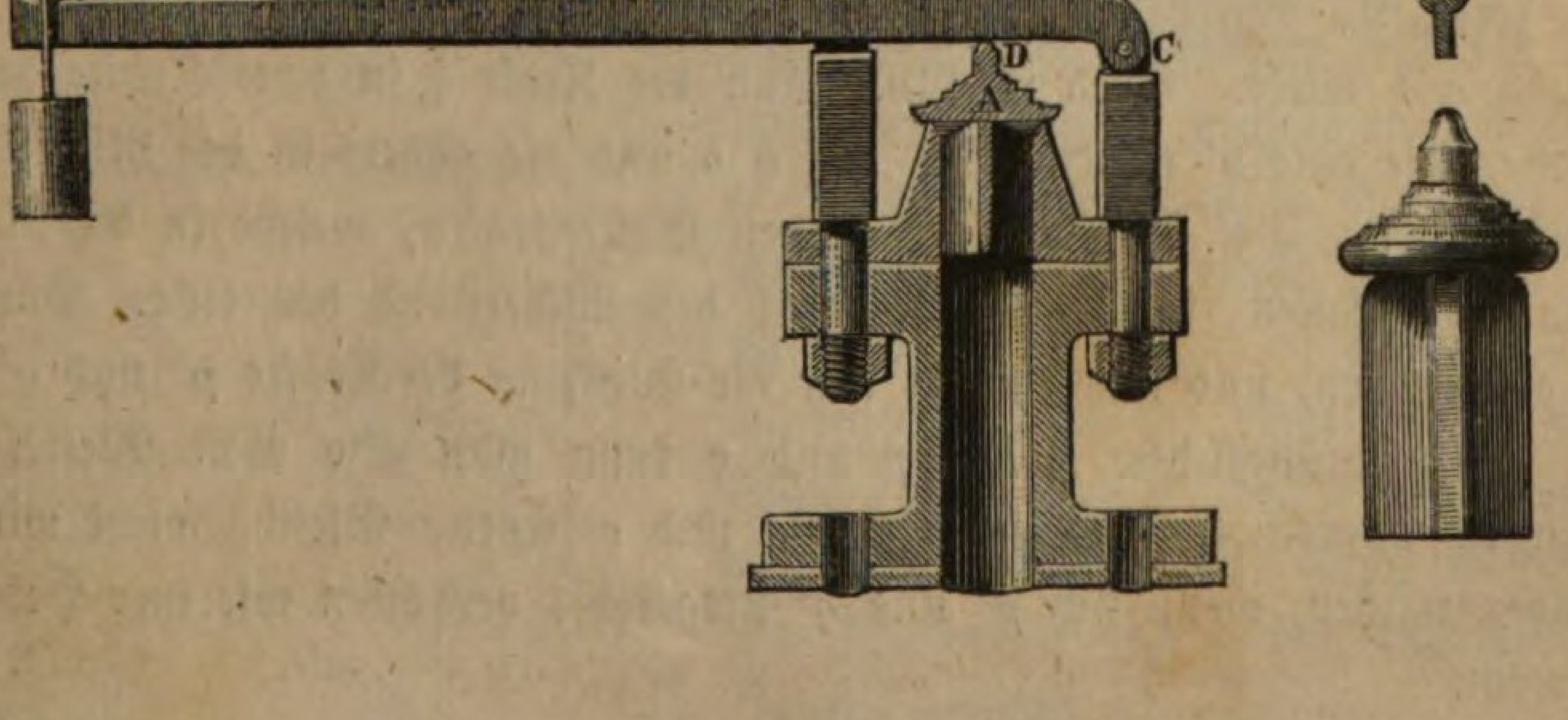
oder

$$N : P = l + l' : l',$$

wenn also die an dem einarmigen Hebel in entgegengesetzten Richtungen wirkenden Kräfte N und P sich das Gleichgewicht halten sollen, so müssen sie sich ebenfalls **umgekehrt verhalten wie ihre Hebelarme.**

Die Fig. 25 zeigt uns die Anwendung des einarmigen Hebels. Das Ventil A, welches etwa eine Oeffnung eines Dampfkessels verschließt, wird durch den Druck des Dampfes nach oben gedrückt, an dem um C drehbaren Hebelarm

Fig. 25.

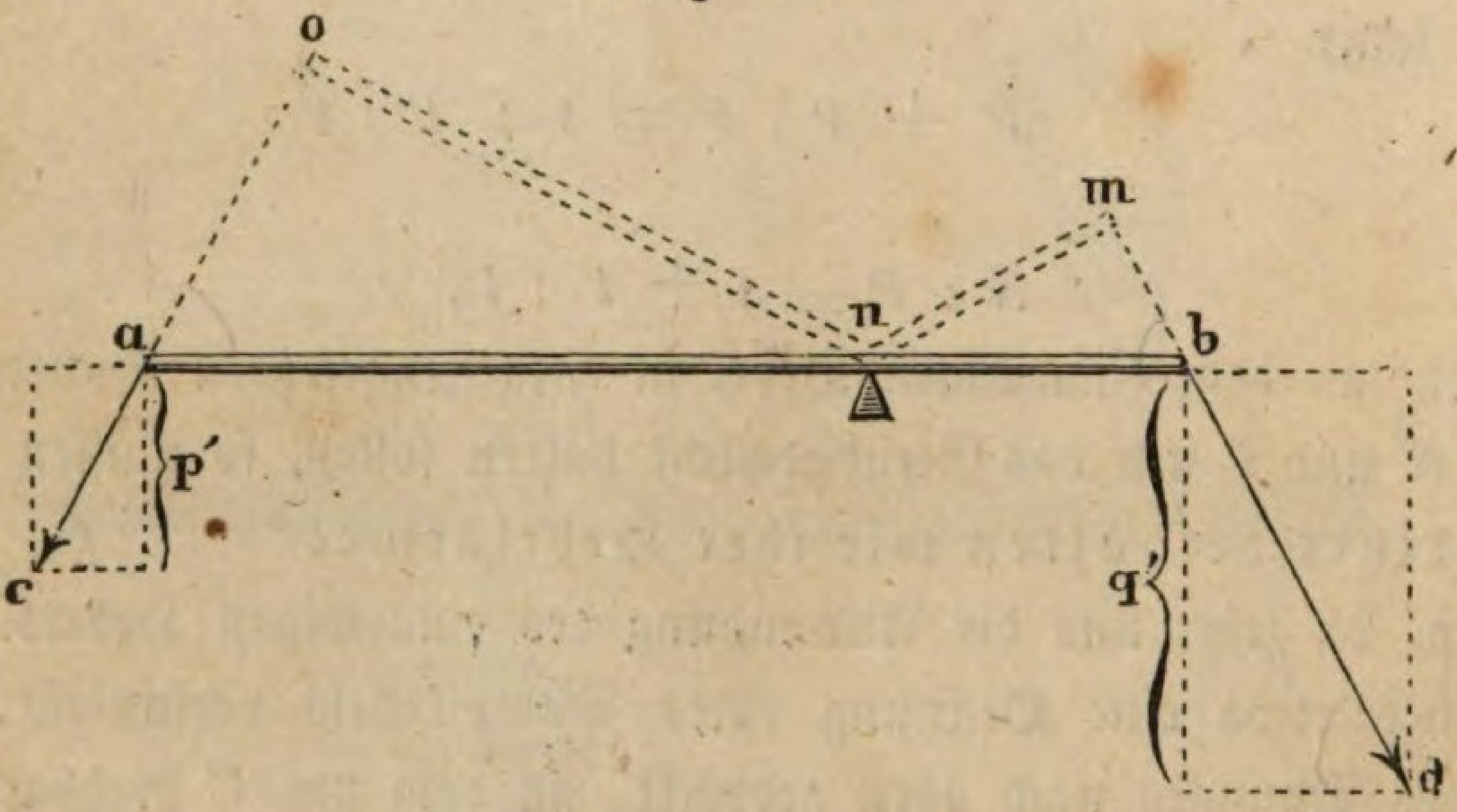


bei *D* angreifend strebt er also, denselben zu heben; diesem nach Oben wirkenden Druck wird aber durch eine weit kleinere Gegenkraft, nämlich durch das bei *B* angehängte den Hebel niederziehende Gewicht, das Gleichgewicht gehalten.

Auch die beiden Endpunkte *m* und *n*, Fig. 24, der Stange *m n* können fest seyn, während in *c* eine Kraft *N* wirkt, alsdann aber hat der Punkt *m* einen Druck *P*, der Punkt *n* einen Druck *P'* auszuhalten. Wenn eine an einer Stange hängende Last durch zwei Leute getragen wird, von denen jeder ein Ende der Stange auf den Schultern liegen hat, so haben beide zusammen die ganze Last zu tragen, und wenn die Last gerade in der Mitte der Stange aufgehängt ist, so kommt auf jeden die Hälfte der Last; wird aber die Last dem einen näher gerückt, so hat dieser einen größeren Theil zu tragen. Gesetzt, die angehängte Last betrage 100 Pfund, die ganze Stange sey 5 Fuß lang und die Last hänge 2 Fuß von dem einen, 3 Fuß vom anderen Ende, so hat die Schulter des einen Trägers einen Druck von 60 Pfund, die des anderen einen Druck von 40 Pfund auszuhalten.

Wir haben bisher nur den Fall betrachtet, wo die Kräfte rechtwinklig gegen den Hebel wirkten, es kann aber auch Gleichgewicht stattfinden, wo dies nicht der Fall ist. In Fig. 26 sey *n* der Stützpunkt des Hebels *a b*, in *a* wirke eine Kraft *p* nach der Richtung *a c*, in *b* eine andere *q* nach der Richtung *b d*. Die Kräfte *p* und *q* sollen sich verhalten, wie die Linien *a c* und

Fig. 26.



b d. Nach dem Satze vom Parallelogramm der Kräfte läßt sich *p* in zwei Kräfte zerlegen, von denen die eine *p'* rechtwinklig auf *a b*, die andere in der Richtung *a b* wirkt. Eben so kann man die Kraft *q* in zwei Kräfte zerlegen, von denen die eine *q'* rechtwinklig auf *a b* und die andere in der Richtung dieser Linie wirkt. Die Wirkung der beiden Seitenkräfte, welche in die Richtung der Linie *a b* fallen, wird offenbar durch den Widerstand des festen Punktes *n* völlig aufgehoben, und somit bleibt nur die Wirkung der Kräfte *p'* und *q'* übrig. Statt der ursprünglichen Kräfte *p* und *q* kann man also ohne Weiteres ihre rechtwinklig angreifenden Seitenkräfte *p'* und *q'* setzen. Gleichgewicht wird aber stattfinden müssen, wenn sich *p'* und *q'* umgekehrt verhalten wie ihre Hebelarme, d. h. wenn

$$p' : q' = n\,b : n\,a$$

oder wenn

$$q' \times n\,b = p' \times n\,a.$$

Verlängert man die Richtung der Kraft p, um auf ihre Verlängerung von n das Perpendikel $n\,o = l$ zu fällen, so entsteht ein Dreieck $a\,o\,n$, welches demjenigen ähnlich ist, dessen Hypotenuse p und dessen eine Kathete p' ist, aus der Aehnlichkeit dieser Dreiecke folgt

$$p : p' = a\,n : l$$

und daraus

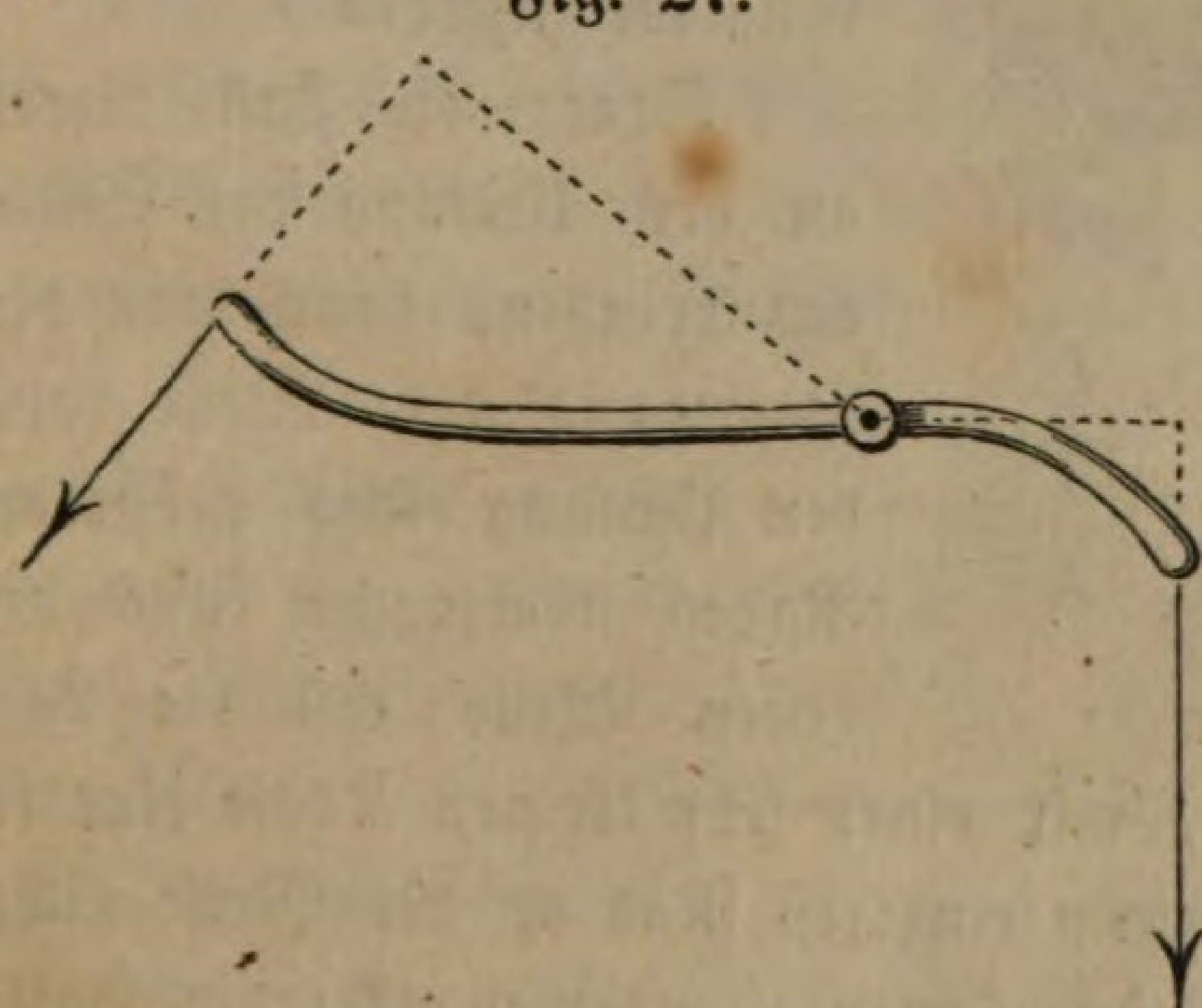
$$q' \times l = p' \times a\,n.$$

Die an den Hebelarm $a\,n$ schief angreifende Kraft p wirkt also gerade so wie ihre in demselben Punkte a angreifende Seitenkraft p', und auch so, als ob die Kraft p selbst rechtwinklig an einem kleineren Hebelarm wirkte, welchen man findet, wenn man vom Drehpunkt n einen Perpendikel auf die Richtung der Kraft fällt.

Das statische Moment einer schräg angreifenden Kraft findet man also, indem man die Kraft multiplicirt mit dem vom Drehpunkt auf die Richtung der Kraft gefällten Perpendikel.

Demnach wirkt die schief angreifende Kraft q gerade so, als ob sie rechtwinklig am Hebelarm $n\,m$ angriffe, und die beiden Kräfte p und q halten sich das Gleichgewicht, wenn $p \times on = q \times nm$.

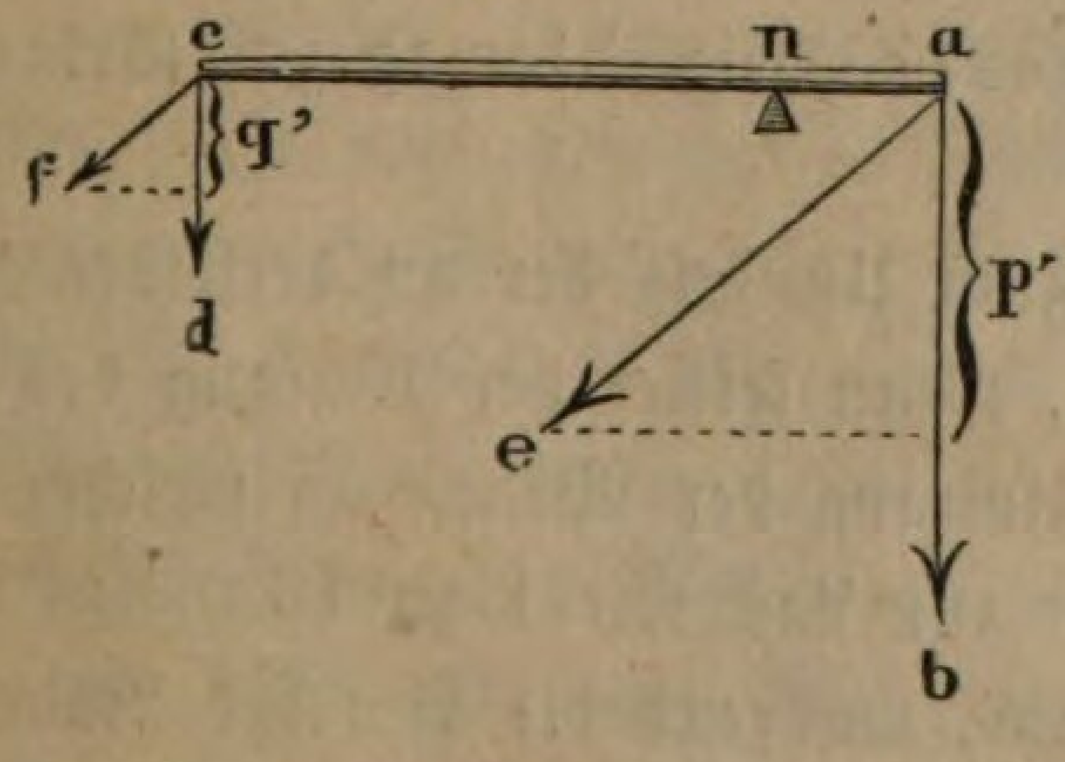
Fig. 27.



Auf die eben entwickelte Weise findet man auch die Momente der Kräfte, wenn der Hebel nicht mehr eine gerade Linie ist, wie Fig. 27.

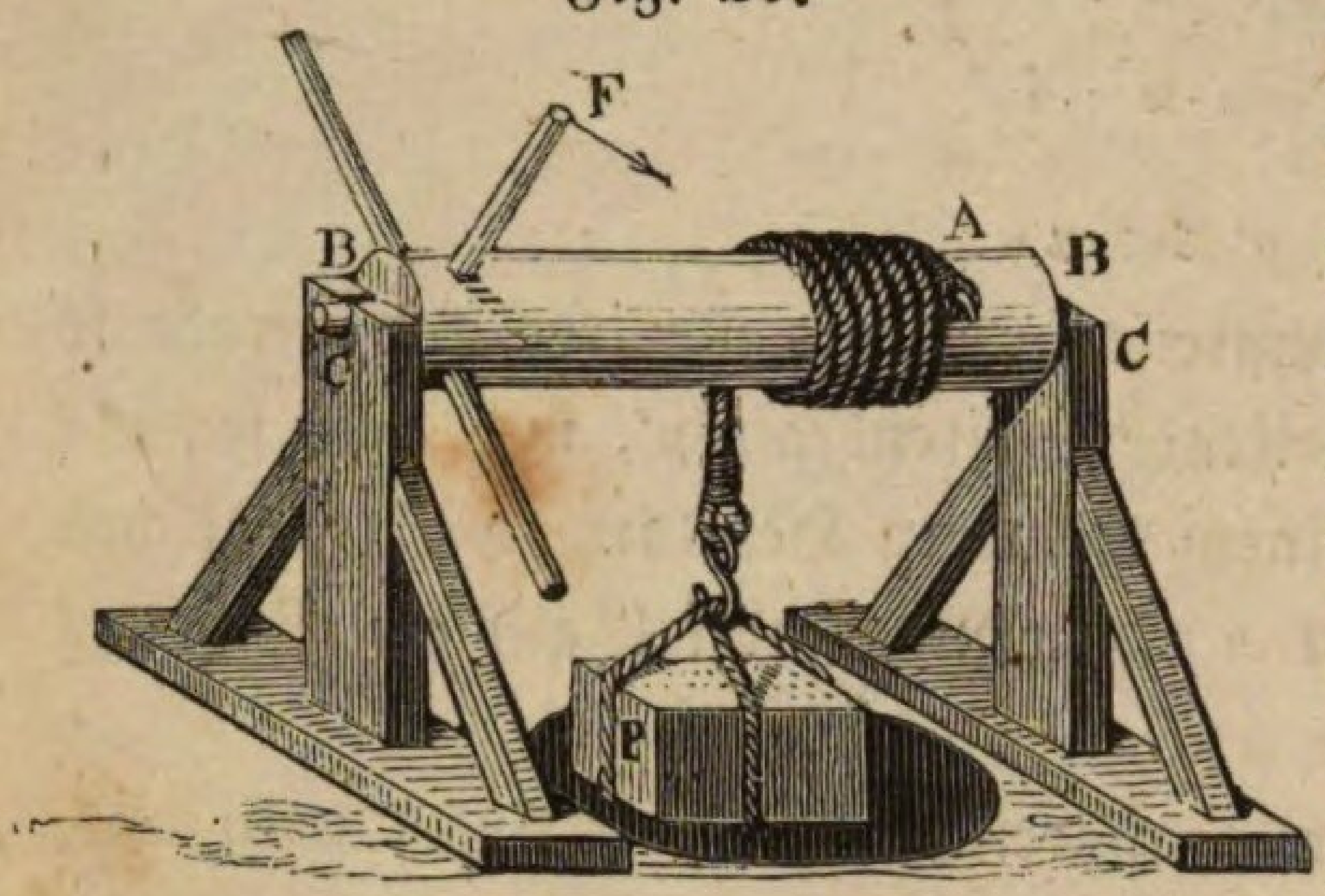
Wenn zwei parallele rechtwinklig angreifende Kräfte an einem Hebel einander das Gleichgewicht halten, so wird das Gleichgewicht nicht gestört, wenn man sie in gleichem Verhältniß vergrößert oder verkleinert. Eben so wenig wird das Gleichgewicht gestört, wenn beide Kräfte ihre Richtung so ändern, daß sie unter sich parallel bleiben. Wenn z. B. die Kräfte $a\,b = p$ und $c\,d = q$ an dem Hebel $a\,c$ sich das Gleichgewicht halten, so besteht dasselbe auch noch, wenn man dieselben Kräfte nach den einander parallelen Richtungen $a\,e$ und $c\,f$ wirken läßt, denn die schräg wirkende Kraft p wirkt wie ihre rechtwinklige Composante p' und die schräg wirkende q wie die rechtwinklig angreifende q'; p' und q' halten sich aber gewiß das Gleichgewicht, wenn es zwischen den Kräften p und q bei rechtwinkligem Angriff bestand.

Fig. 28.



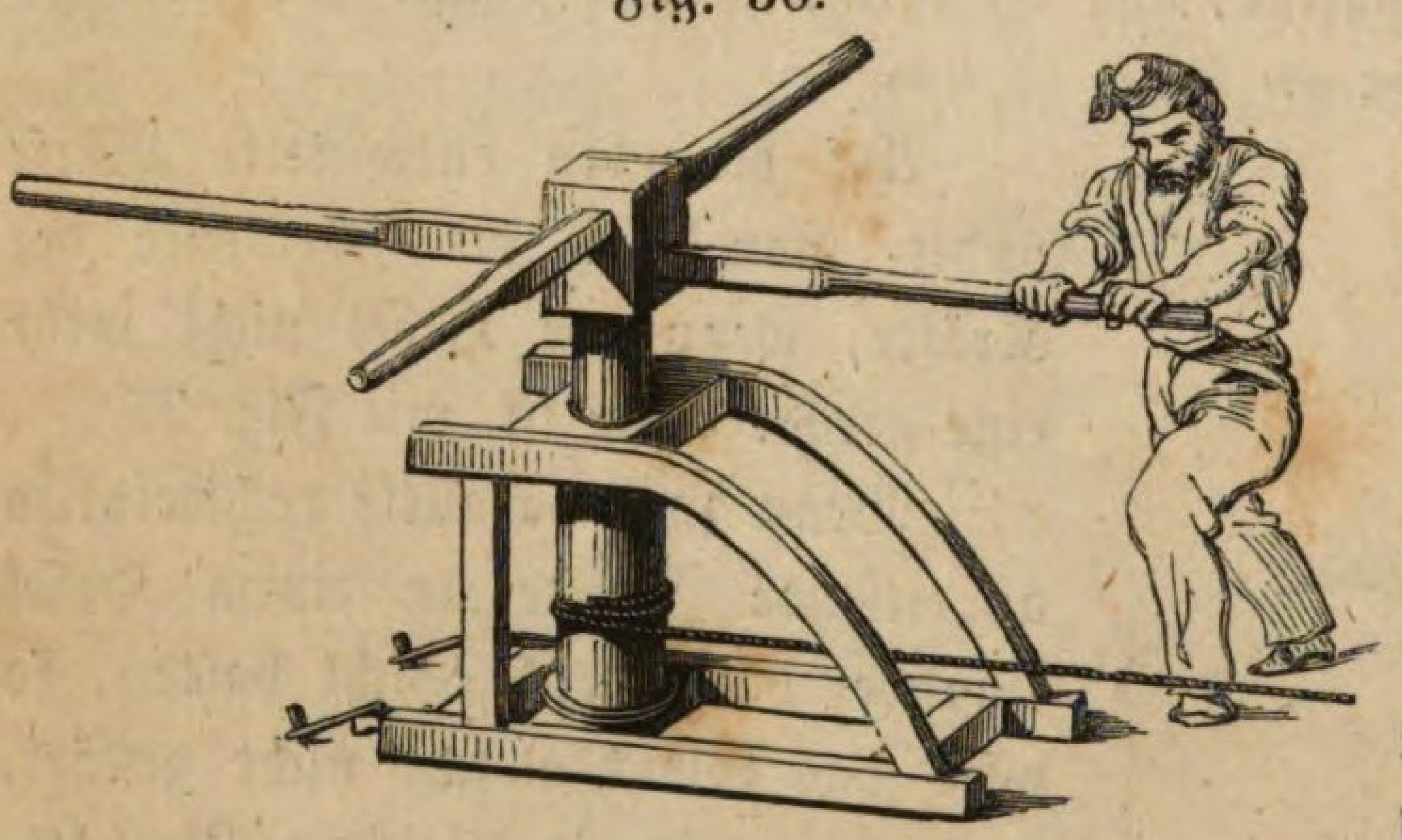
Wenn irgend ein festes System um eine feste Axe drehbar ist, so wirken die Kräfte, welche es um die Axe umzudrehen streben, ganz nach den Gesetzen des Hebels. Deshalb finden diese Gesetze bei den vielen Maschinen eine Anwendung, welche sich in ein mehr oder weniger complicirtes System von Hebeln zerlegen lassen. Beim Haspel und der Winde z. B. (Fig 29 und 30) verhält sich die Last zur entgegenwirkenden Kraft umgekehrt wie ihre Hebelarme, d. h. umgekehrt wie der Halbmesser des Wellbaumes *BB* zur Länge des Hebelarms *CF*. Wenn z. B. der Halbmesser der Welle viermal kleiner ist, als der Hebel *CF*, so kann man mit einer Kraft von 25 Pfund einer Last von 100 Pfund das Gleichgewicht halten.

Fig. 29.



Die Winde (Fig. 30) unterscheidet sich vom Haspel nur dadurch, daß die Umdrehungsaxe vertikal steht; man hat am Ende der horizontalen Hebel eine verhältnißmäßig geringe Kraft anzuwenden, um die Last in horizontaler Richtung fortzuziehen.

Fig. 30.



Statt die Last direct an den Umfang der Welle anzubringen, kann man die Bewegung der Welle auf den Umfang eines größeren Rades übertragen und an dessen Welle erst die Last anbringen, wodurch man im Stande ist, mit einer sehr kleinen Kraft eine so große Last zu bewältigen, wie es mit einem einzigen Rad an der Welle nicht möglich gewesen wäre, ohne unbequeme Dimensionen zu nehmen oder die Haltbarkeit der Maschine zu gefährden.

Die Uebertragung der Bewegung von einer Welle auf ein Rad geschieht durch Zahnräder, in manchen Fällen auch durch Riemen oder Seile.

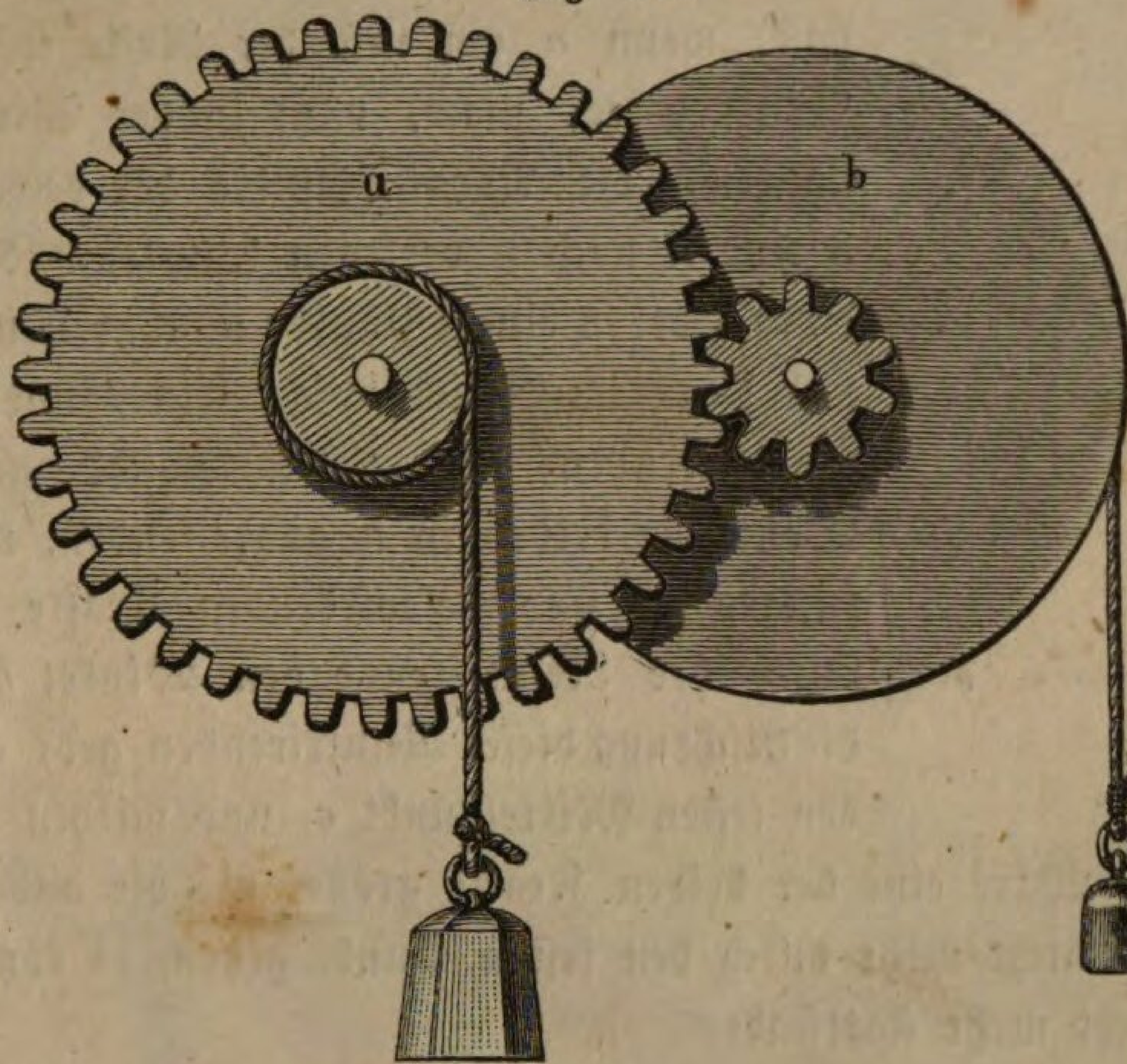
Solche Vorrichtungen, bei denen die Bewegung eines Rades auf ein anderes übertragen wird, nennt man Räderwerke. Fig. 31 mag zur Erläuterung eines Räderwerkes dienen.

Wenn sich der Umfang des Rades *a* zum Umfang der an derselben Axe sitzenden gezahnten Welle verhält wie 4 zu 1, wenn ferner der Umfang des gezahnten Rades *b* 4 mal so groß ist als der Umfang der Welle, an welcher die Last hängt, so ist das Verhältniß von Kraft zur Last wie 1 zu 16.

Die Axe des Rades *a* dreht sich 4mal um, während die Axe des Rades *b* sich nur 1mal umdreht.

Solche Räderwerke werden nicht allein benutzt, um große Lasten mit kleinen Kräften zu heben, wie dies z. B. bei Krahnen der Fall ist, sondern um die Umdrehung einer Axe in eine schnellere oder langsamere zu verwandeln.

Fig. 31.



Ein Mühlstein muß mit ziemlich großer Geschwindigkeit umgedreht werden, während das Wasserrad sich sehr langsam umdreht; durch Vermittelung eines Räderwerkes wird nun die langsame Umdrehung des Wasserrades in eine rasche Umdrehung des Mühlsteins verwandelt. — Aehnliches findet auch bei Uhren Statt.

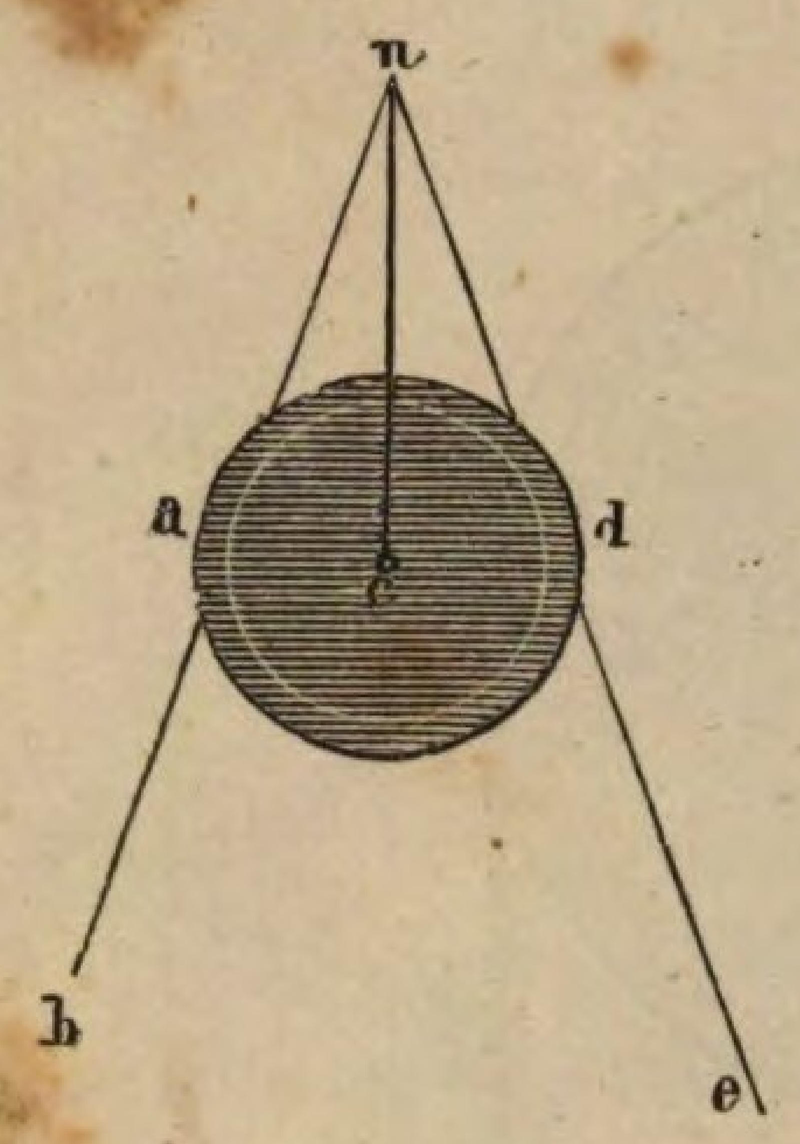
Die Rolle ist eine runde, nicht gar dicke, am Rande ausgehöhlte Scheibe, 21
welche um eine durch ihren Mittelpunkt gehende, auf ihrer Ebene rechtwinklig stehende Axe drehbar ist; diese Axe ist gewöhnlich durch eine Scheere getragen, deren Arme zu beiden Seiten der Rolle bis etwas über ihre Mitte reichen.

Man unterscheidet *feste* und *bewegliche* Rollen. Feste Rollen sind solche, deren Axe unbeweglich ist, so daß keine Verrückung derselben, sondern nur eine Drehung um dieselbe möglich ist.

Wenn um einen Theil des Umfangs einer festen Rolle eine Schnur oder ein Seil gelegt ist, und an beiden Enden derselben Kräfte wirken, so findet nur dann Gleichgewicht Statt, wenn die Kraft, welche das Seil auf der einen Seite spannt, der auf der anderen Seite wirkenden Kraft gleich ist. Es läßt sich dies leicht von vorn herein einsehen, wenn man bedenkt, daß die beiden Kräfte unter sonst ganz gleichen Umständen die Rolle nach entgegengesetzten Richtungen zu drehen streben: man konnte deshalb auch oben Seite 16 schon die Rolle in Anwendung bringen, ohne daß es nöthig gewesen wäre, eine Betrachtung über das Gleichgewicht der Kräfte an der Rolle vorauszuschicken. Uebrigens läßt sich das Gleichgewicht der Kräfte an der Rolle auch vom Parallelogramm der Kräfte ableiten, und von diesem Gesichtspunkte aus be-

trachtet wollen wir die Rolle hier näher besprechen. Fig. 32 stellt eine um ihren festen Mittelpunkt *c* drehbare Rolle vor; das um dieselbe geschlungene Seil sei durch Kräfte gespannt, welche nach den Richtungen *ab* und *de* wirken.

Fig. 32.



Denken wir uns die Linien *de* und *ab* bis zu ihrem Durchschnittspunkte *n* verlängert, so ist klar, daß, wenn *n* ein mit der Rolle fest verbundener Punkt wäre, man, ohne in der Wirkung etwa zu ändern, die Angriffspunkte der beiden Kräfte von *a* und *d* nach *n* verlegen könnte, und so hätte man dann zwei in einem Punkte *n* angreifende Kräfte, die nur dann im Gleichgewicht sein können, wenn ihrer Resultirenden das Gleichgewicht gehalten wird. Wenn die beiden in *n* angreifenden, nach den Richtungen *nb* und *ne* wirkenden Kräfte gleich sind, so wird ihre Resultirende den Winkel *bne* halbiren, die Richtung dieser Resultirenden geht alsdann durch den festen Mittelpunkt *c*, und mithin findet Gleichgewicht Statt. Wäre eine der beiden Kräfte größer als die andere, so würde die Resultirende nicht mehr durch den festen Punkt gehen, es könnte also auch kein Gleichgewicht mehr stattfinden.

Der Druck, den die Axe der Rolle auszuhalten hat, ist offenbar der Resultirenden der beiden Kräfte gleich, und wenn die Richtungen der beiden Kräfte parallel sind, wie Fig. 33, so ist der Druck auf die Axe gleich der Summe der beiden Kräfte (wozu noch das Gewicht der Rolle selbst zu rechnen ist).

Auch an einer beweglichen Rolle kann nur dann Gleichgewicht stattfinden, wenn die Kräfte, welche die beiden Enden des Seils spannen, einander gleich sind, denn nur in diesem Falle geht ihre Resultirende durch den Mittelpunkt der Scheibe; die Wirkung dieser Resultirenden wird aber nicht dadurch aufgehoben, daß der Mittelpunkt fest ist, sondern dadurch, daß in dem Mittelpunkte, und zwar in der Richtung der Resultirenden, eine dritte Kraft wirkt, welche dieser Resultirenden gleich und entgegengesetzt ist. Diese dritte Kraft ist gewöhnlich an einem an der Scheere befestigten Haken angebracht; in Fig. 34 ist sie durch das Gewicht dargestellt.

Wenn die beiden Enden des um die bewegliche Rolle geschlungenen Seils einander parallel sind, wie Fig. 35, so ist klar, daß die Kraft, mit welcher jedes Seilende gespannt wird, halb so groß ist als die Last, welche an der Scheere hängt.

Wenn zwei oder mehrere Rollen in einem Gehäuse sich befinden, wenn sie also gleichsam eine gemeinschaftliche Scheere haben, so nennt man eine solche Zusammensetzung eine **Flasche**. Wenn zwei Flaschen, von denen die eine fest, die andere beweglich ist, durch ein Seil so verbunden werden, daß es abwech-

selnd von einer festen auf eine bewegliche Rolle geht, so erhält man einen Flaschenzug.

Fig. 33.

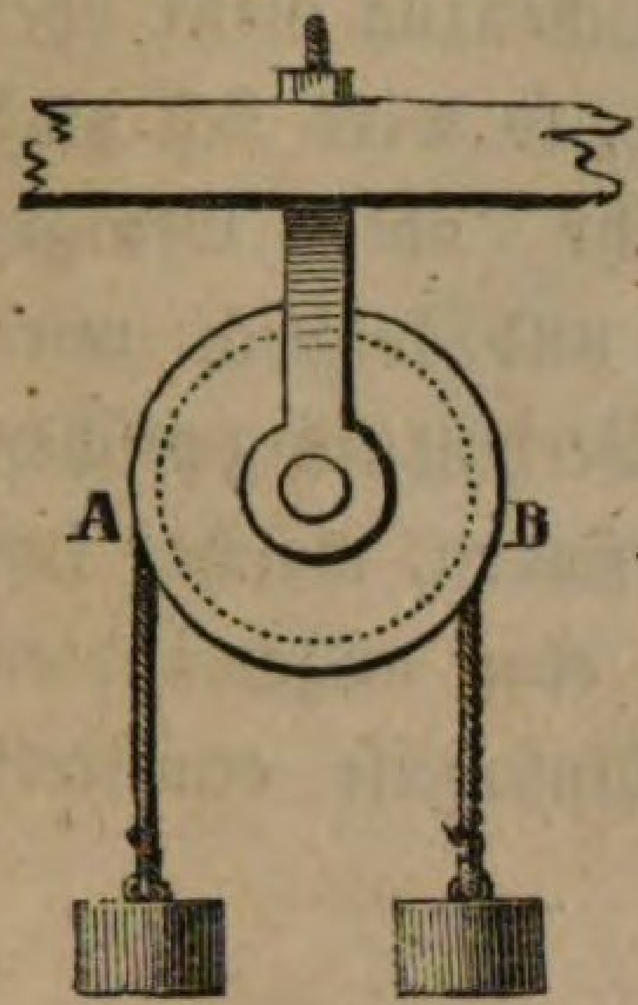


Fig. 34.

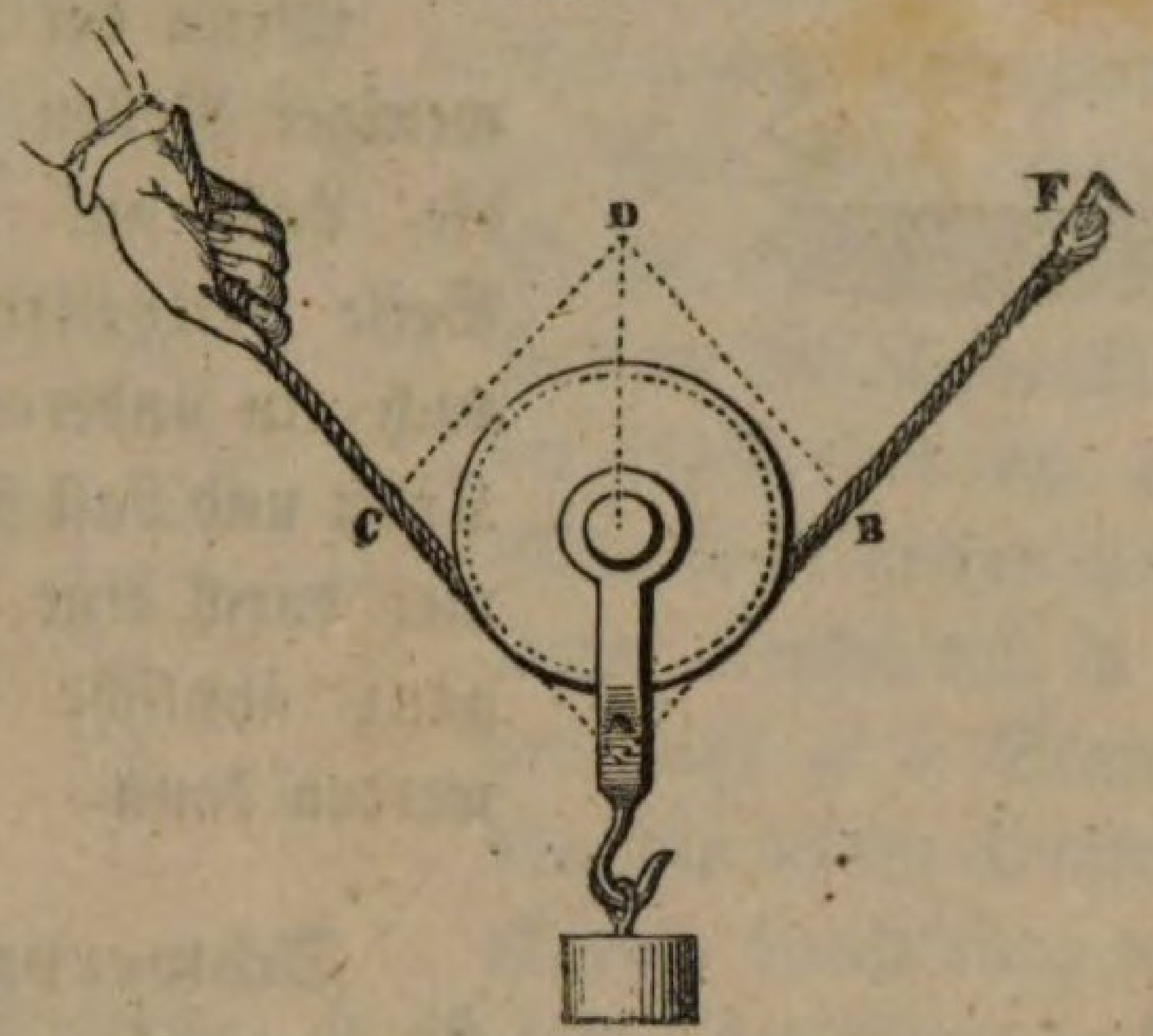


Fig. 35.

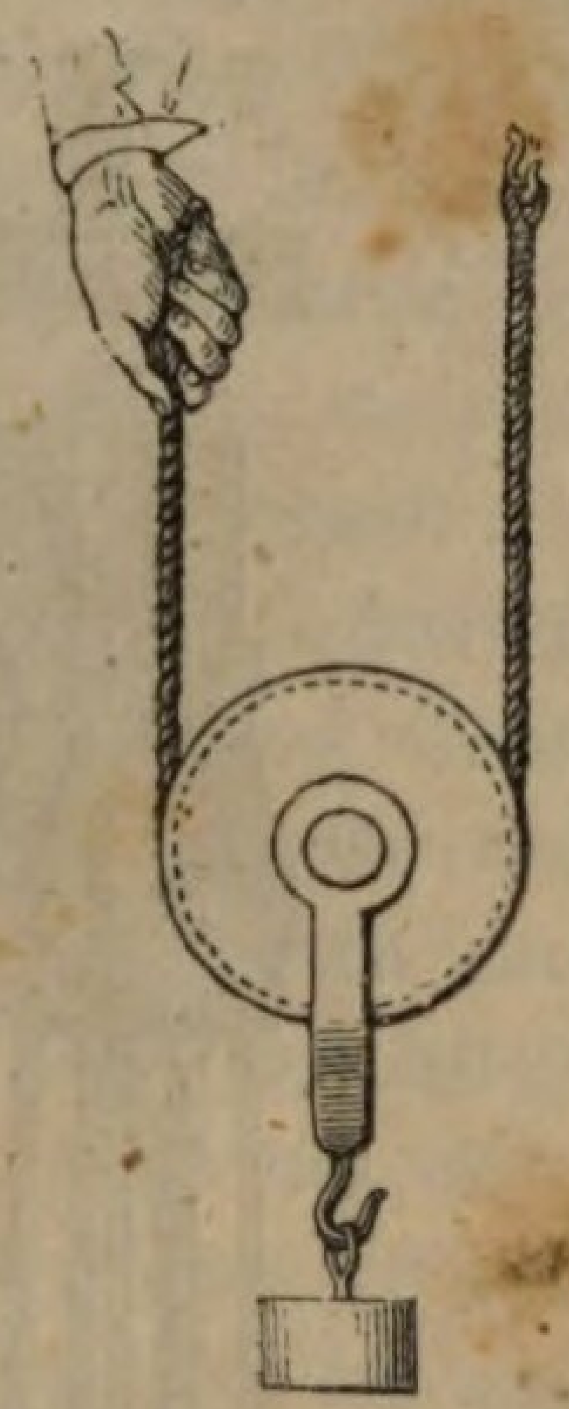
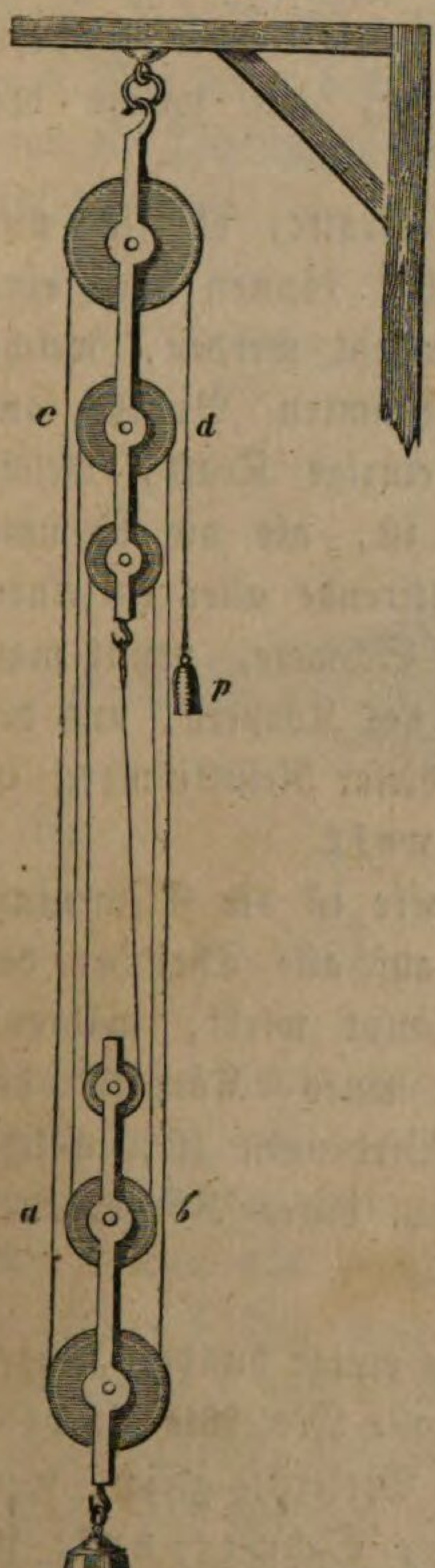


Fig. 36.

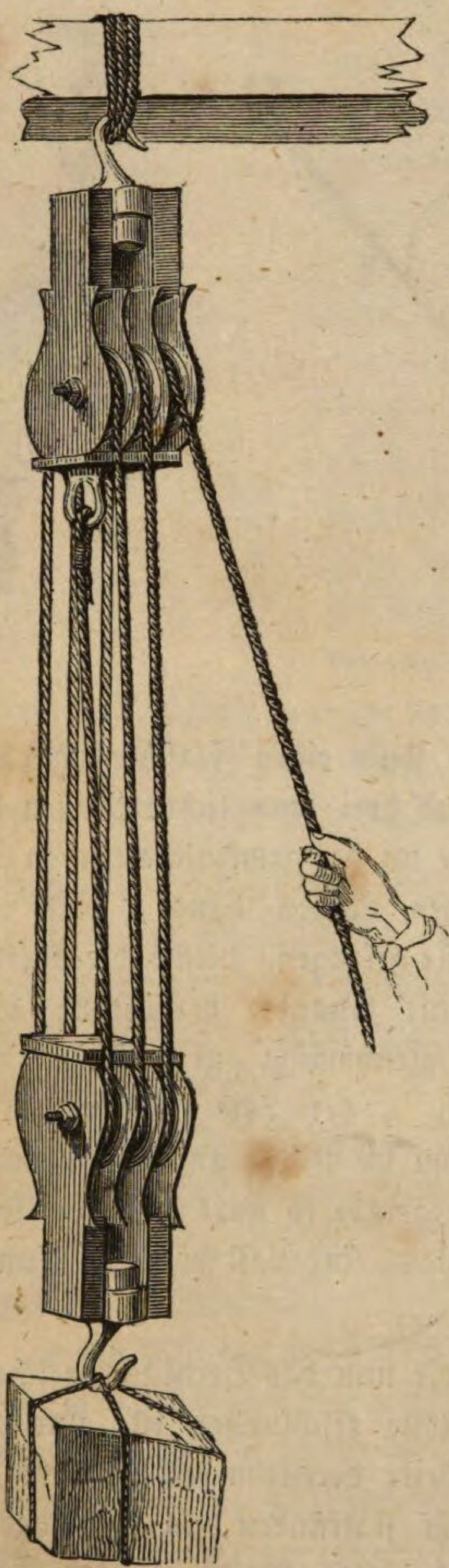


Die Fig. 36 stellt einen Flaschenzug dar, der aus drei festen und drei beweglichen Rollen besteht. Die Last *q*, welche an der gemeinschaftlichen Scheere der drei beweglichen Rollen hängt, wird offenbar durch die sechs Seile getragen, welche die oberen und unteren Rollen mit einander verbinden; die Last vertheilt sich also gleichmäßig auf 6 Seile, und folglich ist jedes durch $\frac{1}{6}$ der Last *q* gespannt; wäre z. B. eine Last von 60 Pfund angehängt, so würde jedes der 6 Seile gerade so stark gespannt sein, als ob es für sich allein eine Last von 10 Pfunden zu tragen hätte.

Betrachten wir nun das Seilstück, welches über die oberste feste Rolle geschlungen ist, und welches auf der rechten Seite derselben frei herunter hängt. Soll Gleichgewicht stattfinden, so muß das Seilstück auf der linken und auf der rechten Seite der obersten Rolle gleich stark gespannt seyn; das Seilstück links ist aber, wie wir gesehen haben, durch $\frac{1}{6}$ der Last *q* gespannt; folglich muß man, um das Gleichgewicht zu erhalten, an das Ende des Seils *d* ein Gewicht anhängen, welches gleich $\frac{1}{6}$ *q* ist. Einer Last von 60 Pfund kann man also an unserm Flaschenzuge mit einer Kraft von 10 Pfund das Gleichgewicht halten.

Fig. 37 zeigt eine andere Form des Flaschenzugs, hier sind nämlich die zusammengehörigen Rollen neben einander gesetzt.

Fig. 37.



Wenn der Flaschenzug mehr oder weniger Rollen hat, so wird sich auch die Last auf mehr oder weniger Seile vertheilen, und folglich wird auch ein anderes Verhältniß zwischen Kraft und Last stattfinden, welches immer durch eine der eben angewandten ganz ähnliche Schlußweise ermittelt werden kann.

22 **Schwerpunkt.** Ein schwerer Körper, wie groß oder klein er auch seyn mag, kann als eine Vereinigung unendlich vieler materieller Punkte betrachtet werden, auf welche die Schwere wirkt.

Alle diese Kräfte, obgleich unendlich an Zahl, können durch eine einzige Kraft ersetzt werden, welche an einem bestimmten Punkte angreift. Diese einzige Kraft, welche nichts Anderes ist, als die Summe oder die Resultirende aller einzelnen Wirkungen der Schwere, nennt man das G e w i c h t des Körpers, und der Angriffspunkt dieser Resultirenden ist sein S c h w e r p u n k t.

Die Schwere ist die Elementarkraft, welche auf alle Theilchen der Materie überhaupt wirkt, während das Gewicht eines Körpers die Summe der Wirkungen ist, welche die Schwere auf diesen Körper insbesondere ausübt.

In einem schweren Körper, welcher nicht wenigstens einige hundert Meter Ausdehnung hat, ist die Richtung der Schwerkraft für alle Moleküle als vollkommen parallel zu betrachten, sie ist aber auch für die Moleküle gleich, weil alle Moleküle im leeren Raum gleich schnell fallen. Der S c h w e r p u n k t ist demnach nichts Anderes, als der Angriffspunkt der Resultirenden einer Reihe p a r a l l e l e r g l e i c h e r K r ä f t e.

Daß es in einem jeden festen Körper einen solchen Schwerpunkt geben muß, läßt sich aus den Gesetzen der Wirkung paralleler Kräfte ableiten. Wenn eine gerade unbeugsame Linie *a b* (Fig. 38) in ihrer Mitte unterstützt und an beiden Enden mit gleichen Gewichten belastet ist, so muß Gleichgewicht stattfinden, wie man die Linie auch um den Angriffspunkt der Mittelkraft drehen mag; das Gleichgewicht findet ebensowohl in der Lage *a b* als in der Lage *a' b'* Statt. Stellen wir uns vor, die beiden Punkte *a* und *b* seyen zwei schwere, durch die gerade, feste, gewichtlose Linie *a b* verbundene Moleküle, so ist klar, daß Gleichgewicht stattfinden muß, sobald nur der Punkt *c* unterstützt ist, welches auch die Lage der Linie *a b* seyn mag. Der Punkt *c* wäre hier nichts Anderes, als der Schwerpunkt des aus zwei Molekülen bestehenden Körpers. Ohne das Gleichgewicht zu stören, kann man die Wirkungen der Schwerkraft beider Moleküle im Schwerpunkt *c* vereinigt denken.

Fig. 38.

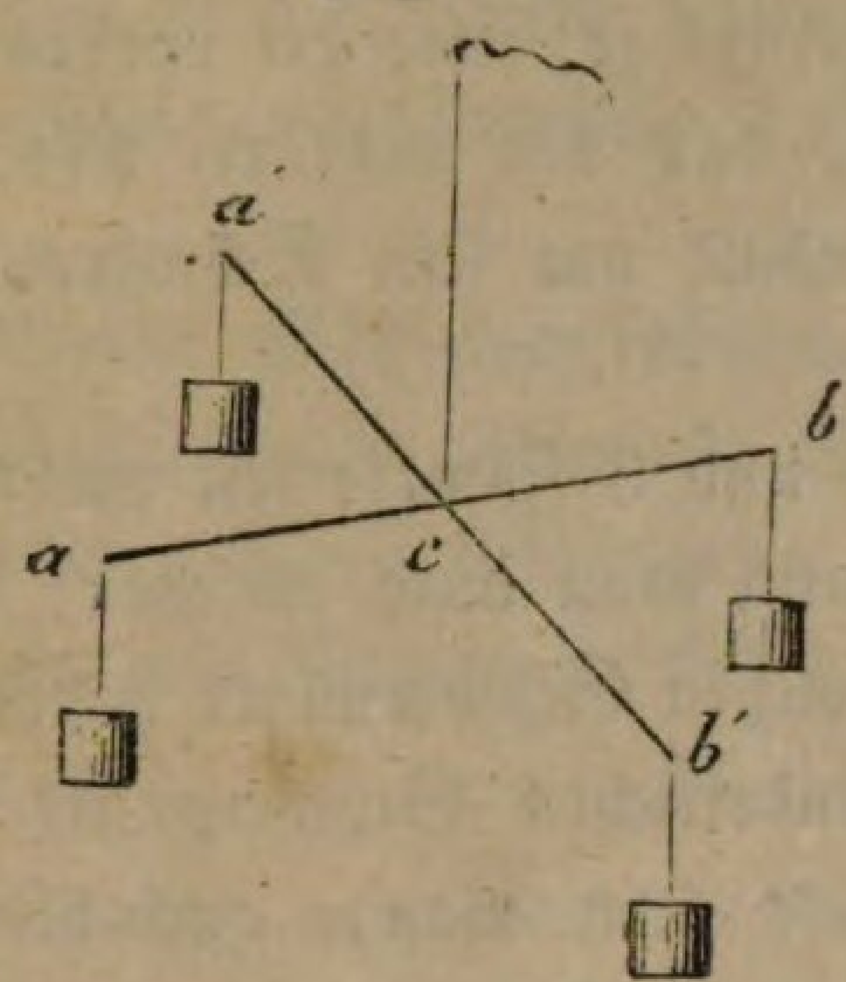
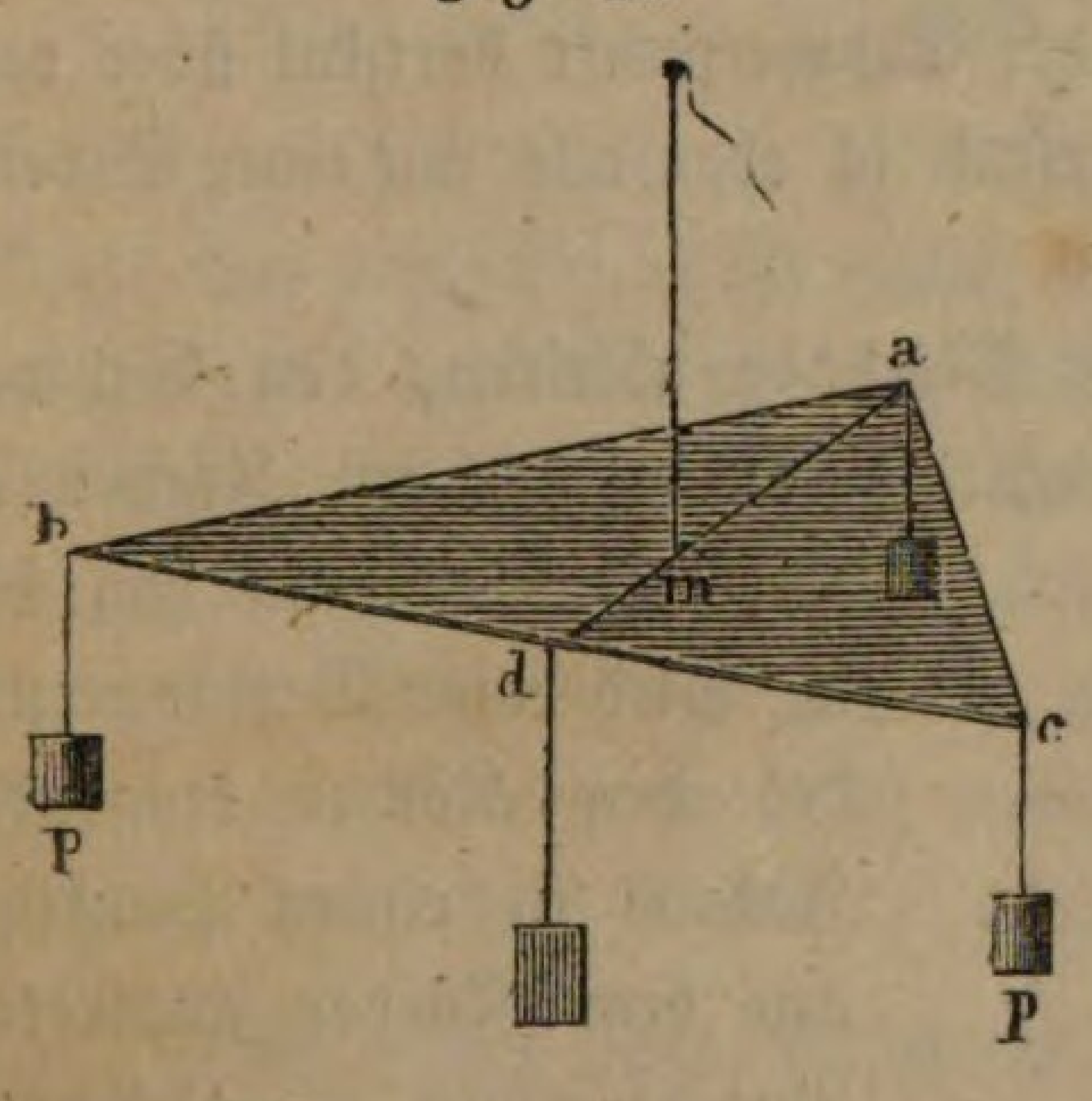


Fig. 39.



Wenn an den drei Eckpunkten eines gewichtlosen Dreiecks *a b e* (Fig. 39) drei gleiche parallele Kräfte wirken, so ist es leicht, den Angriffspunkt ihrer Mittelkraft zu bestimmen. Ohne das Gleichgewicht zu stören, kann man die beiden in *b* und *e* wirkenden Kräfte in der Mitte *d* der Linie *b e* vereinigen, und so ist die Wirkung der drei Kräfte auf die Wirkung von zweien reducirt, welche in den Punkten *a* und *d* angreifen. Die in *d* angreifende Kraft ist doppelt so groß, als die in *a* angreifende; wenn man demnach die Linie *a d* durch den Punkt *m* so in zwei Theile theilt, daß *a m* doppelt so groß ist, als *d m*, so muß zwischen den in *d* und *a* wirkenden parallelen Kräften 2 *p* und *p* nothwendig Gleichgewicht stattfinden, wenn nur der Punkt *m* unterstützt ist, welches auch übrigens die Lage der Linie *a d* seyn mag. Da aber die in *d* wirkende Kraft ja nur die Resultirende der in *b* und *e* wirkenden parallelen Kräfte ist, so kann man, ohne etwas zu ändern, auch diese selbst wieder statt ihrer Resultirenden nehmen, und somit ist klar, daß zwischen den drei parallelen in *a*, *b* und *e* angreifenden Kräften nothwendig Gleichgewicht besteht, wenn der Punkt *m* unterstützt ist, oder man in *m* eine Kraft in entgegengesetzter Richtung wirken läßt, welche gleich 3 *p* ist, welches auch übrigens die Lage des Dreiecks seyn mag.

Stellen wir uns vor, die Punkte *a*, *b* und *e* seyen drei schwere Moleküle, welche stets in unveränderlicher Stellung gegen einander zu bleiben genöthigt sind, so wirkt die Schwerkraft dieser Moleküle gerade so, wie die vorher in *a*, *b* und *e* angehängten Gewichte, und es ist klar, daß der aus drei Molekülen bestehende Körper im Gleichgewicht seyn wird, sobald nur sein Schwerpunkt *m* unterstützt ist.

Gerade so aber wie sich zeigen läßt, daß 2 und 3 schwere fest verbundene Moleküle einen Schwerpunkt haben müssen, so kann man auch einsehen, daß je 4, 5, 6 u. s. w. fest verbundene Moleküle einen solchen Schwerpunkt haben müssen, daß endlich jeder feste Körper einen unveränderlichen Schwerpunkt haben muß, wie groß auch die Anzahl der Moleküle seyn mag, aus denen er besteht.

Damit ein schwerer Körper im Gleichgewicht sey, braucht nur eine einzige Bedingung erfüllt zu seyn, nämlich die, daß sein Schwerpunkt unterstützt ist. Wenn demnach der Schwerpunkt eines Körpers für sich selbst ein fester Punkt ist, so mag man den Körper auf alle nur mögliche Weisen drehen, er wird immer im Gleichgewicht seyn. Man kann den Versuch mit einer homogenen Scheibe machen, die man um eine horizontale, feste Axe dreht, welche durch ihren Schwerpunkt geht. — Wenn ein Körper in einem Punkte unterstützt ist, welcher nicht mit dem Schwerpunkt zusammenfällt, so ist das Gleichgewicht zwar noch möglich, aber es findet nicht in allen Lagen, sondern nur bei zwei besonderen Stellungen Statt, wenn nämlich der Schwerpunkt vertikal über oder unter dem Unterstützungspunkt liegt. Der Versuch ist ebenfalls mit einer Scheibe leicht anzustellen.

Aus diesen Betrachtungen läßt sich eine Methode ableiten, den Schwerpunkt der Körper durch den Versuch zu finden. Man hänge den Körper an

Fig. 40.

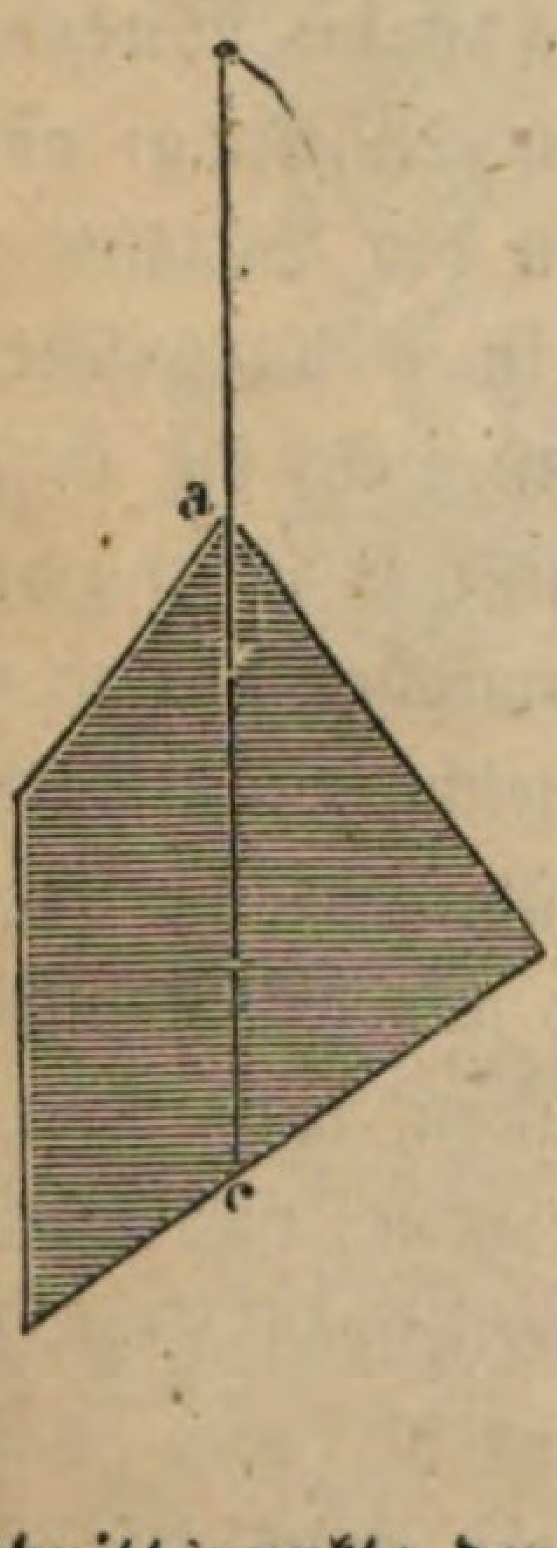
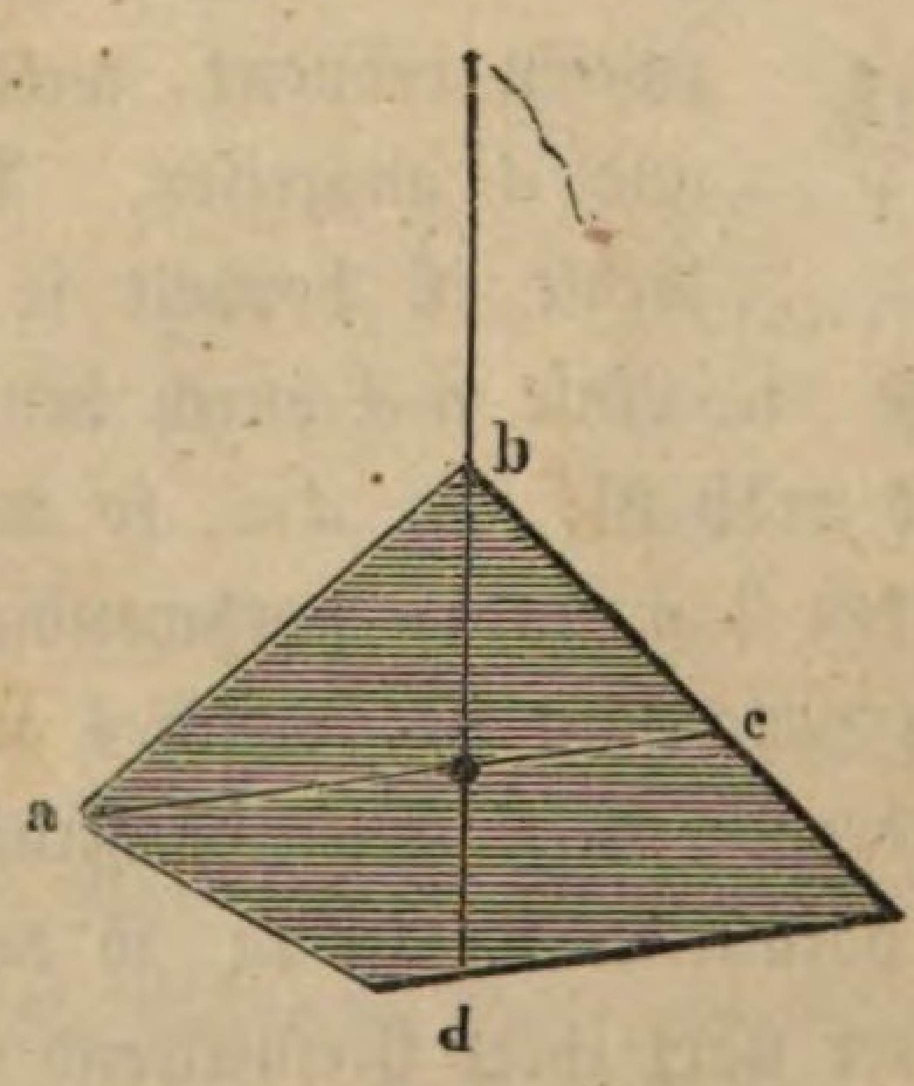


Fig. 41.



einem Punkte *a* auf (Fig. 40), so wird die Verlängerung des den Körper tragenden Fadens in einem Punkte *c* aus dem Körper austreten. Auf der Linie *a c* muß nothwendig der Schwerpunkt liegen. Hängt man den Körper in einem zweiten Punkte *b* (Fig. 41) auf, so muß der Schwerpunkt abermals auf der Verlängerung des Fadens, also auf der Linie *b d*, liegen; der Schwerpunkt liegt also auf dem Durchschnittspunkte der Linien *b d* und *a c*. Der Schwerpunkt von homogenen ebenen Scheiben ist nach dieser Methode leicht zu bestimmen, bei anderen Körpern ist

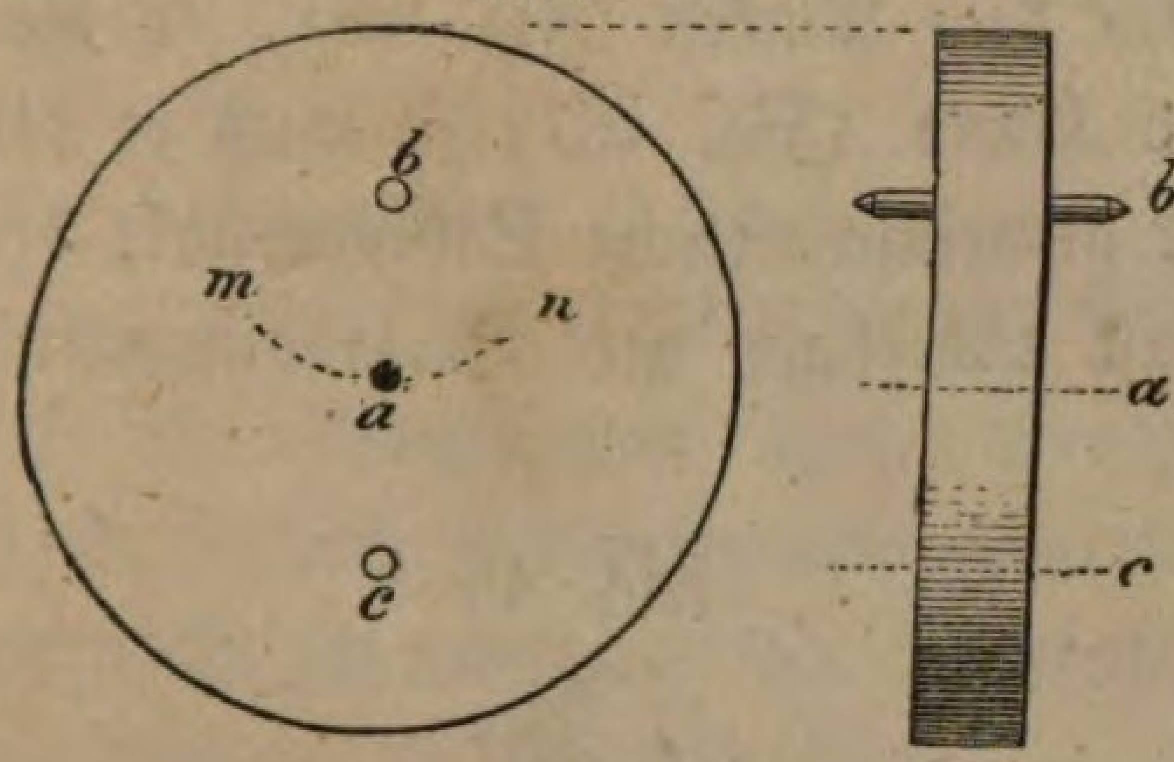
es jedoch mit Schwierigkeiten verbunden, die Verlängerung des vertikalen Fadens durch das Innere des Körpers genau zu ermitteln.

Der Schwerpunkt homogener Körper von regelmäßiger Gestalt läßt sich durch einfache geometrische Betrachtungen bestimmen.

Vom Gleichgewicht. Wir haben schon gesehen, daß die einzige Gleich- 23
gewichtsbedingung schwerer Körper die ist, daß ihr Schwerpunkt unterstützt seyn muß. Diese Bedingung aber kann auf verschiedene Weise erfüllt seyn, je nachdem die Körper in festen Punkten aufgehängt sind oder auf Stützpunkten ruhen.

Denken wir uns durch eine homogene Scheibe (Fig. 42) drei Löcher *a*, *b* und *c* gemacht. *a* soll durch den Schwerpunkt der Scheibe gehen. Die Scheibe wird in allen Lagen im Gleichgewicht seyn, wenn eine feste Axe durch das mittlere Loch *a* geht. In diesem Fall hat man ein indifferentes Gleichgewicht. Wenn die Axe durch das obere Loch *b* geht, so ist das Gleichgewicht stabil, weil, wenn man die Scheibe aus dieser Lage entfernt, sie immer wieder in dieselbe zurückzukehren strebt. Dreht man die Scheibe nur etwas um die Axe *b*, so wird nämlich der Schwerpunkt auf dem Bogen *mn* nach der rechten oder linken Seite hin verrückt; er ist nicht mehr unterstützt, weil er nicht mehr vertikal unter *b* liegt, und die auf ihn wirkende Schwerkraft treibt ihn wieder nach der Gleichgewichtslage zurück. Wenn die Axe durch das untere Loch *c* geht, so findet zwar noch Gleichgewicht, aber ein labiles Gleichgewicht Statt, denn sobald der Schwerpunkt nur im mindesten aus der durch *c* gehenden Vertikalen entfernt wird, kehrt er nicht zurück, sondern er beschreibt einen Halbkreis, bis er vertikal unter dem Punkte *c* anlangt.

Fig. 42.



Man kann diese Resultate allgemein so ausdrücken: Ein an einer Axe aufgehängter Körper kann in stabilem, labilem oder indifferentem Gleichgewicht sich befinden, je nachdem sein Schwerpunkt unter, über oder in der Axe selbst liegt.

Wenn ein Körper mit mehr oder weniger breiter Basis auf dem Boden steht, so muß die durch seinen Schwerpunkt gezogene Vertikale noch die Basis selbst treffen, wenn Gleichgewicht stattfinden soll. Demnach muß der schiefe Cylinder (Fig. 44 a. f. S.) umfallen, weil die Projection seines Schwerpunkts außerhalb der Fläche liegt, auf welcher er stehen soll, während der schiefe Cylinder (Fig. 43 a. f. S.) stehen bleibt.

Ein Körper steht um so fester, je breiter seine Basis ist, und je weniger hoch sein Schwerpunkt über dieser Basis liegt. Ein vierfüßiges Thier steht fest,

wenn der Schwerpunkt seines ganzen Körpers über dem Viereck liegt, welches auf dem Boden durch seine vier Füße bezeichnet ist. Wenn ein Mensch einen

Fig. 43.

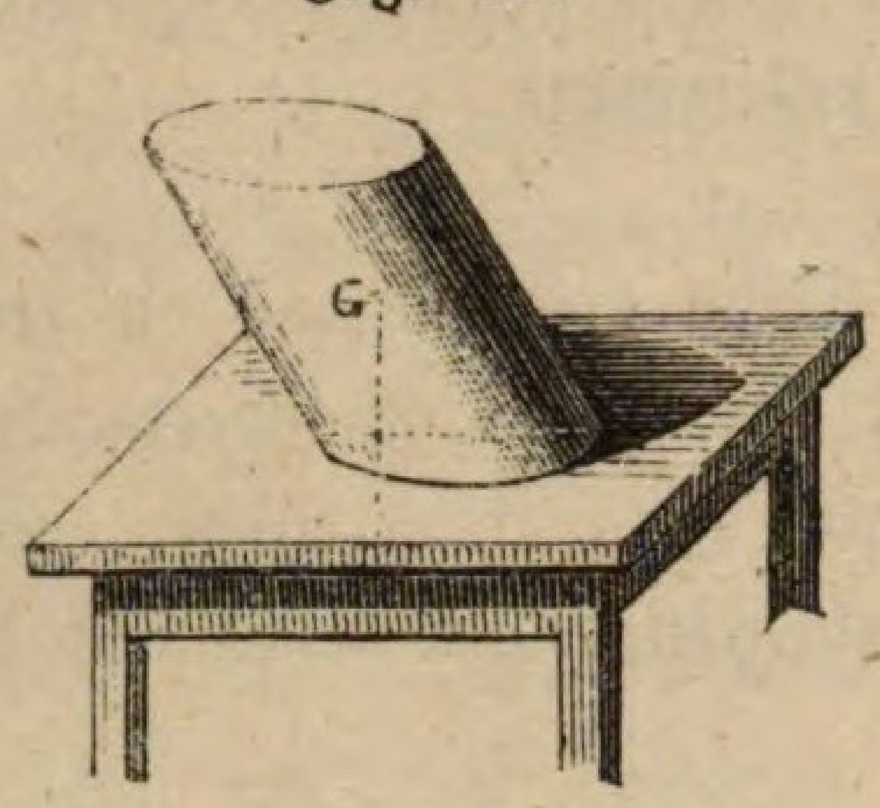
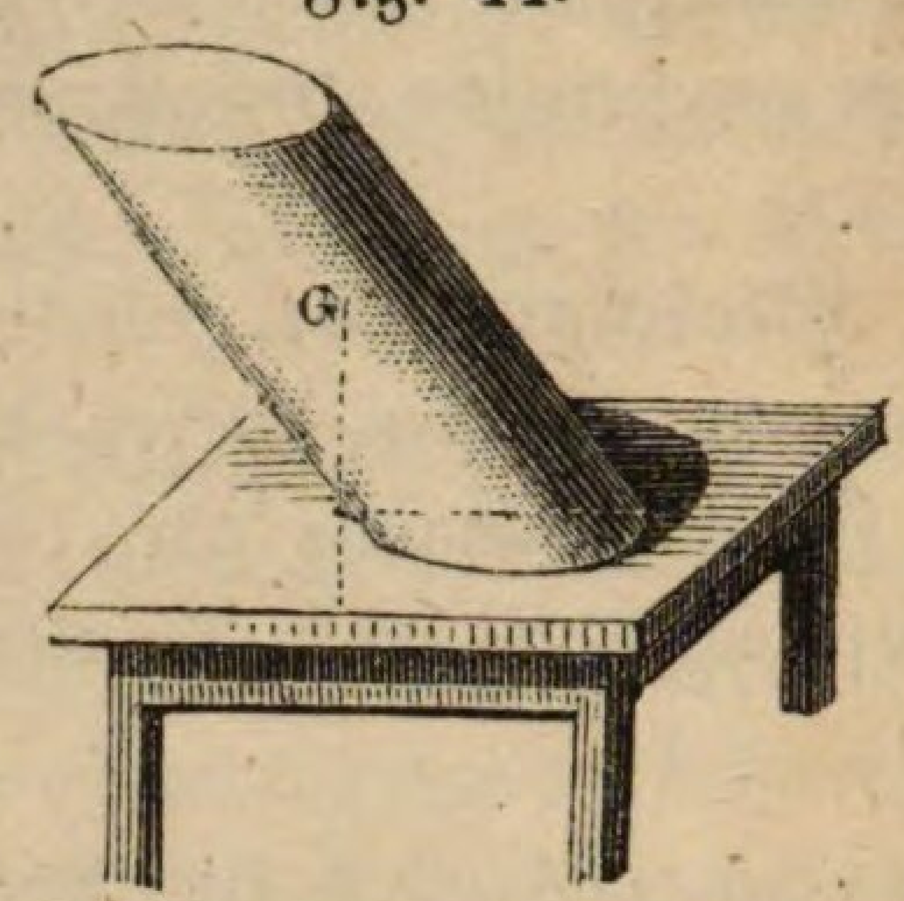


Fig. 44.



Arm aufhebt, so wird der Schwerpunkt seines Körpers verrückt; wenn ein Vogel seinen Hals ausstreckt, so wird sein Schwerpunkt bedeutend nach vorn gerückt. Ein Mensch, welcher Lasten trägt, muß, je nach der Art des Tragens, seine Stellung ändern. Trägt er die Last auf dem Rücken (Fig. 45), so muß er sich vorbeugen, trägt er sie in der linken Hand (Fig. 46), so muß er den Oberkörper rechts neigen, denn sonst fiele der gemeinschaftliche Schwerpunkt des menschlichen Körpers und der getragenen Last außerhalb der Verbindungslinie der Füße, er müßte also umfallen.

Fig. 45.



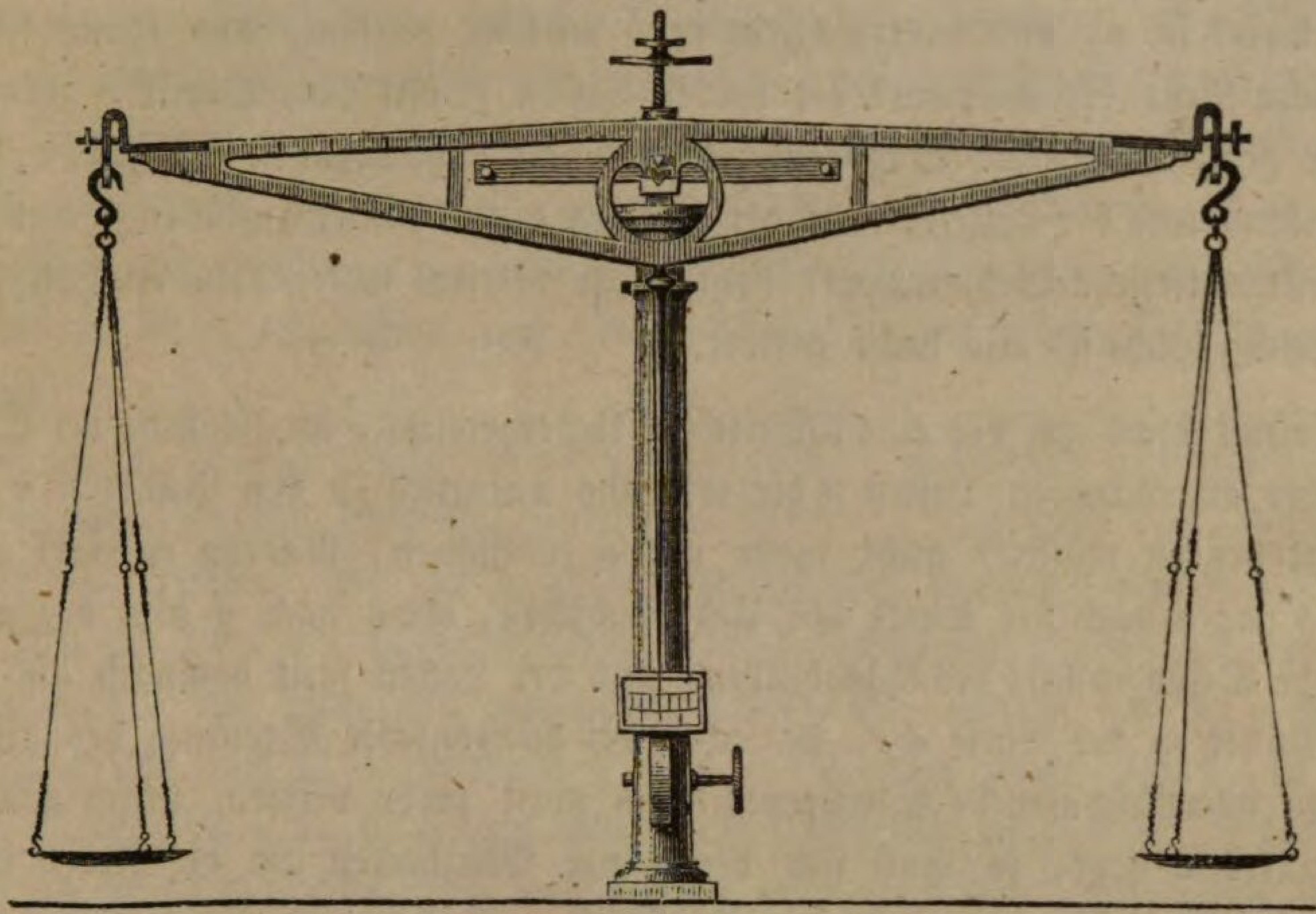
Fig. 46.



24 **Die Wage.** Die gewöhnliche Wage besteht im Wesentlichen aus einem Stabe, einem Balken, welcher um eine wagerechte feste Axe drehbar ist, die sich in der Mitte seiner Länge befindet. Ohne Belastung an den Enden soll der Wagbalken eine vollkommen horizontale Lage annehmen. Auf beiden Seiten des Wagbalkens hängen Wagschalen, welche zur Aufnahme des zu wägenden Körpers und der Gewichte dienen. Bei gleicher Belastung der Wagschalen muß der Wagbalken seine horizontale Stellung beibehalten; bringt man jedoch in die eine Schale ein Uebergewicht, so muß sich der Wagbalken nach dieser Seite senken.

Wir wollen nun untersuchen, durch welche Einrichtung den eben ausgesprochenen Forderungen Genüge geleistet werden kann. Denken wir uns vor-

Fig. 47.



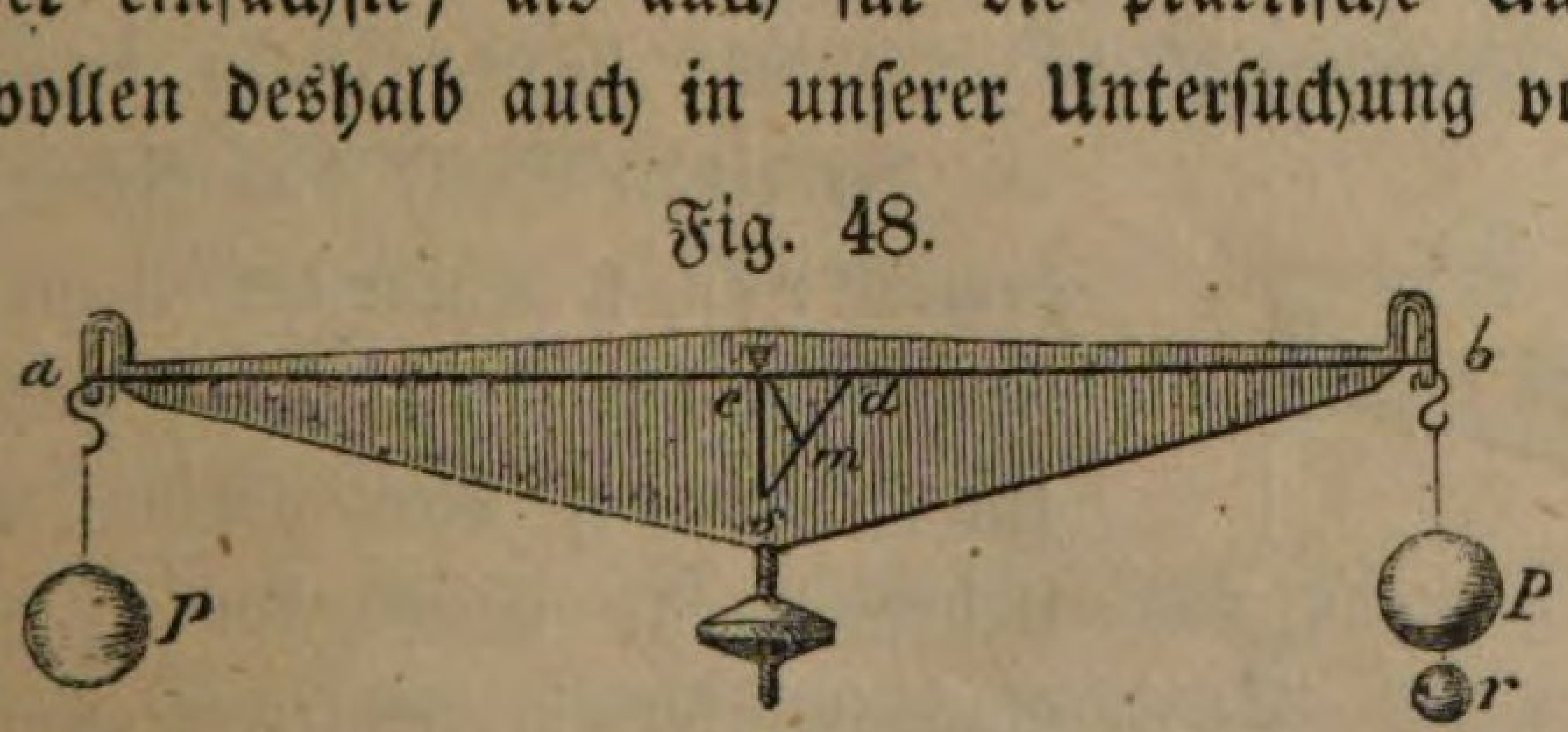
erst die Wagschalen noch weg, und nehmen wir an, der Wagebalken sey in seinem Schwerpunkte unterstützt, so haben wir den Fall eines indifferenten Gleichgewichts; der Wagbalken wird bei jeder beliebigen Neigung gegen die Horizontale im Gleichgewicht seyn. Eine solche Vorrichtung erfüllt also die erste Forderung nicht, daß der Wagbalken für sich, ohne Belastung an den Enden, eine horizontale Lage annehmen muß. Dieser Forderung kann nur dadurch genügt werden, daß der Schwerpunkt des Wagbalkens unter seinem Drehpunkt liegt.

Denken wir uns rechtwinklig auf die Längenaxe des Wagbalkens eine verticale Linie gezogen, welche den Wagbalken halbirt, so muß diese Linie durch den Drehpunkt des Wagbalkens und durch seinen Schwerpunkt gehen.

Durch das Anhängen der Wagschalen wird in unserem Raisonnement nichts geändert, denn wir können uns ihr Gewicht im Aufhängepunkt vereinigt denken, und dann machen sie einen integrirenden Theil des Wagbalkens aus.

Wenn man die Aufhängepunkte der Wagschalen durch eine gerade Linie verbindet, so kann diese Linie durch den Drehpunkt gehen, oder über oder unter demselben liegen. Der erstere dieser drei Fälle ist sowohl für die Betrachtung der einfachste, als auch für die praktische Ausführung der zweckmäßigste, wir wollen deshalb auch in unserer Untersuchung von diesem Falle ausgehen.

Fig. 48.



In Fig. 48 sey *a b* die gerade Linie, welche die Aufhängepunkte der Wagschalen verbindet, deren Gewicht wir uns in den Punkten *a* und *b* vereinigt denken; *c* sey der Aufhängepunkt

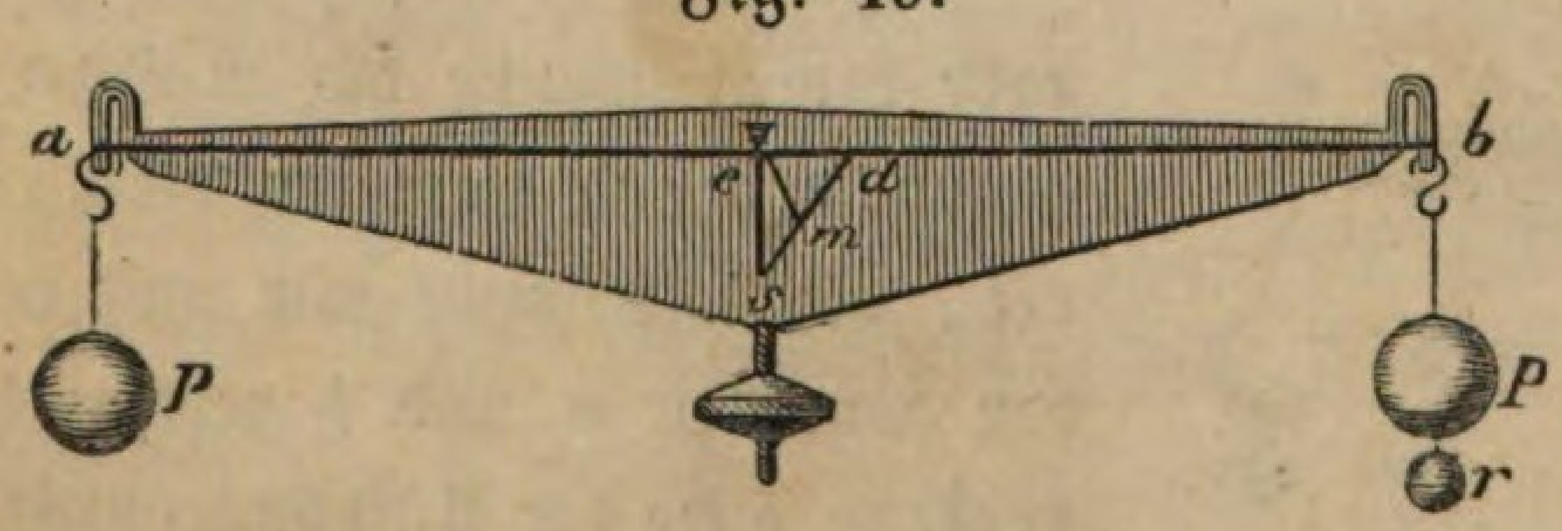
des Wagbalkens, also der Drehpunkt desselben; *s* aber der unter *c* liegende Schwerpunkt des Wagbalkens. Wenn in *a* und *b* gleiche Gewichte *P* angehängt werden, so bleibt der Wagbalken in horizontaler Lage stehen, denn man kann sich die eine der Lasten direct in *a*, die andere direct in *b* wirkend denken, und somit fällt der gemeinschaftliche Schwerpunkt der beiden Lasten *P* mit dem Punkt *c* zusammen, und der gemeinschaftliche Schwerpunkt aller an *c* hängenden Massen, d. h. des Wagbalkens und der Lasten *P* fällt demnach in einen Punkt zwischen *c* und *s*, dieser gemeinschaftliche Schwerpunkt liegt noch vertikal unter dem Aufhängepunkt, das Gleichgewicht ist also nicht gestört.

Bringt man auf der einen Seite ein Uebergewicht *r* an, so fällt der Schwerpunkt der angehängten Lasten (die wir uns natürlich in den Punkten *a* und *b* vereinigt denken müssen) nicht mehr mit *c* zusammen, sondern er rückt auf der Linie *ab* von *c* nach der Seite des Uebergewichts, etwa nach *d* hin, der gemeinschaftliche Schwerpunkt des Wagbalkens und der Lasten fällt demnach auf irgend einen Punkt *m* der Linie *ds*; da aber bei horizontaler Stellung des Wagbalkens der gemeinschaftliche Schwerpunkt *m* nicht mehr vertikal unter dem Aufhängepunkte *c* liegt, so muß sich der ganze Wagbalken um die Axe *c* so weit drehen, bis diese Bedingung wieder erfüllt ist. Dabei wird sich nothwendig der Arm *ca* heben, *cb* aber senken. Der Winkel, welchen der Wagbalken für den Fall des Uebergewichts auf der einen Seite mit der Horizontalen macht, heißt Ausschlagswinkel.

Wir wollen nun untersuchen, wie eine Wage eingerichtet seyn muß, damit sie recht empfindlich sey, d. h. damit sie bei einem kleinen Uebergewicht schon einen großen Ausschlag gebe.

1) Der Schwerpunkt des Wagbalkens muß möglichst nahe unter dem Aufhängepunkte liegen, denn wenn bei übrigens unveränderten Umständen der Schwerpunkt *s* des Wagbalkens in die Höhe gerückt wird, so rückt auch der Punkt *m* vertikal nach oben, was offenbar eine Vergrößerung des Ausschlages zur Folge hat. Bei guten Wagen hat man eine Vorrichtung angebracht, welche eine Regulirung der Lage des Schwerpunktes möglich macht. In der Verlängerung der Linie *cs* ist nämlich eine feine Schraube angebracht, an welcher ein den Umständen entsprechendes Gewicht auf- und abgeschraubt werden kann, womit offenbar eine Verrückung des Schwerpunktes verbunden ist. Hätte man dies Gewicht so weit hinaufgeschraubt, daß *s* mit *c* zusammenfiele, so hätte man ohne Belastung und bei gleicher Belastung auf beiden Seiten den Fall des indifferenten Gleichgewichtes; brächte man dann auf der einen Seite das Uebergewicht *r* an, so würde der Punkt *m* auf die Linie *ab* fallen, d. h. also schon bei dem geringsten Uebergewichte würde der Ausschlagswinkel ein rechter werden,

Fig. 49.



der Wagbalken würde ganz umschlagen, kurz das Instrument würde aufhören, brauchbar zu seyn.

2) Die Empfindlichkeit der Wage wächst mit der Länge der Wagbalken. Wenn man, ohne sonst etwas zu verändern, den Wagbalken verlängern könnte, so würde die Entfernung *c d* in demselben Verhältniß größer werden, und der Punkt *m* würde also auch nach einer Richtung, die mit *a b* parallel ist, weiter von der Linie *c s* weggerückt werden, die Linie *c m* würde also einen größeren Winkel mit *c s* machen, der Ausschlagswinkel würde also wachsen. (Es ist leicht einzusehen, daß der Winkel *m c s* selbst dem Ausschlagswinkel gleich ist.)

3) Der Wagbalken muß möglichst leicht seyn. In dem Punkte *d* können wir uns das Gewicht der Lasten $2P+r$, in *s* aber das Gewicht des Wagbalkens, welches wir mit *g* bezeichnen wollen, vereinigt denken. Offenbar hängt nun die Lage des gemeinschaftlichen Schwerpunktes *m* von der Größe der an den Enden der Linie *d s* wirkenden Kräfte ab. Wenn das in *s* wirkende Gewicht *g* und das in *d* wirkende $2P + r$ einander gleich wären, so fiele *m* in die Mitte von *d s*, je kleiner aber *g* im Vergleich zu $2P + r$ wird, desto mehr muß *m* nach *d* hinrücken, und desto größer wird dann begreiflicherweise der Ausschlag.

Was nun die beiden letzten Punkte betrifft, so ist man doch an gewisse Gränzen gebunden, welche man nicht überschreiten darf, ohne daß die Wage wegen der zu großen Länge der Wagbalken zu unbequem für den Gebrauch würde, oder wegen ihrer Leichtigkeit die nöthige Haltbarkeit verlöre.

Es versteht sich von selbst, daß man bei der Construction einer Wage alle Sorgfalt darauf zu verwenden hat, die Wagbalken gleich lang zu machen. Da jedoch kleine Fehler nicht zu vermeiden sind, so muß man durch die Methode der Wägung einen etwaigen Fehler zu corrigiren suchen. Die zweckmäßigste Wägungsmethode möchte in dieser Beziehung wohl folgende seyn: Man legt den zu wägenden Körper auf die eine Wagschale, und bringt ihn durch Sand, Schrotkörner oder sonstige Gegenstände, die man auf die andere Wagschale legt, in's Gleichgewicht. Ist dies erreicht, so nimmt man den zu wägenden Körper weg und substituirt statt seiner so viel Gewichte, daß das Gleichgewicht dadurch abermals hergestellt wird. Diese neu aufgelegten Gewichte geben genau das Gewicht des Körpers an, die Wagbalken mögen nun gleich lang seyn oder nicht.

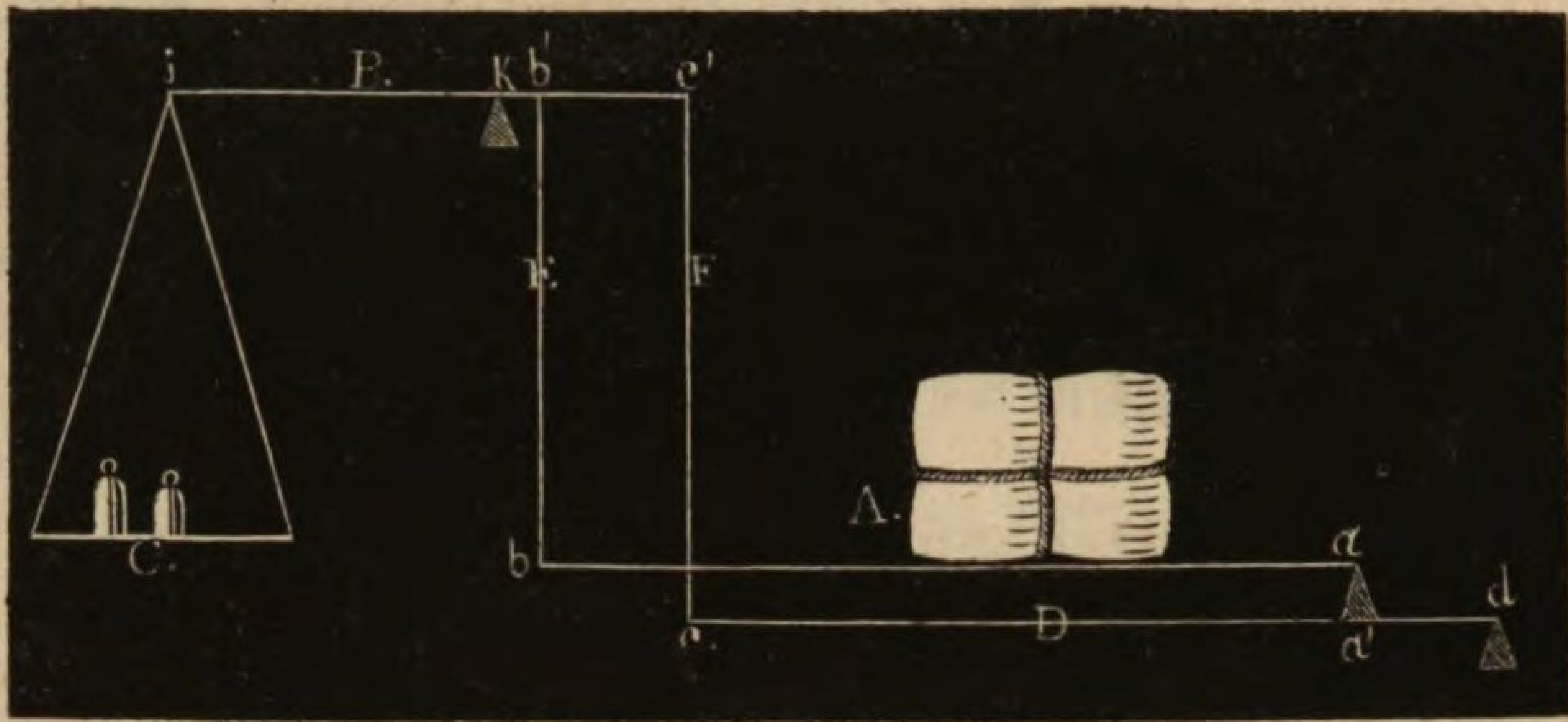
Damit an der Drehungsaxe eine möglichst geringe Reibung stattfinde, wird sie durch eine Schneide von Stahl gebildet; auch die Wagschalen sind an solchen Schneiden aufgehängt.

Es möchte wohl hier der geeignetste Platz seyn, auch die Brückenwage, die zur Wägung größerer Lasten so außerordentlich bequem ist, zu beschreiben.

Fig. 50 (a. f. S.) stellt die Einrichtung der Brückenwage schematisch dar. Die Last liegt auf einem Brette *A*, welches bei *a* auf einer Schneide ruht, bei *b* aber

an einer Stange E befestigt ist, die bei b' an dem einen Arme eines auf der Schneide K ruhenden Hebels angehängt ist.

Fig. 50.



Die Schneide a ruht auf einem Hebel D, dessen Drehpunkt bei d ist und dessen anderes Ende c an einer bei c' angehängten Stange F befestigt ist.

Wenn Kb' sich zu Kc' genau ebenso verhält wie da' zu dc, was bei einer guten Brückenwage durchaus der Fall seyn muß, so wirkt die auf das Brett A gelegte Last gerade ebenso, als ob sie ganz an die Stange E angehängt wäre, welche Stelle des Brettes A die Last auch einnehmen mag.

Es ist dies leicht zu beweisen. Ein Theil des Gewichts der Last, die wir mit P bezeichnen wollen, drückt auf die Schneide a, ein Theil zieht an der Stange E. Bezeichnen wir mit q den Druck auf die Schneide a, mit p den Zug an der Stange E, so ist $p + q = P$.

Die Last q, welche die Schneide a niederdrückt, wirkt an dem Hebelarm $a'd$; nehmen wir an, es sey $cd = n \cdot a'd$, so müßte man in c eine Last $\frac{q}{n}$ anbringen, wenn sie an dem Hebel D dieselbe Wirkung hervorbringen sollte, wie die in a' wirkende Kraft q; dadurch also, daß bei a' die Kraft q drückt, wird die Stange F mit einer Kraft niedergezogen, welche gleich $\frac{q}{n}$ ist.

An dem Hebelarm B ziehen also rechts von der Schneide K zwei Kräfte, nämlich bei b' die Last p, bei c' aber die Kraft $\frac{q}{n}$.

Die Kraft $\frac{q}{n}$, welche in c' angreift, wirkt aber gerade so, als wie eine $n$mal größere Kraft, welche bei b' hängt, weil $Kc' = n \times Kb'$, also gerade so, als ob bei b' die Last $\frac{q}{n} \cdot n = q$ hinge; die beiden Kräfte, welche bei b' und c' angreifen, ziehen also den Hebel gerade eben so stark nieder, als ob bei b' die Last $p + q = P$ angehängt wäre.

Am linken Ende des Hebelarms B, bei i ist die Wagschale angehängt, auf welche die Gewichte gelegt werden. Das Gewicht auf der Wagschale ist ein aliquoter Theil der Last P; das Verhältniß zwischen Last und Gewicht hängt

ab von dem Verhältniß des Hebelarms $K\,b'$ zu $K\,i$. In der Regel sind die Brückenwagen so construirt, daß das Gewicht $^1/_{10}$ der Last ist, daß man also mit 10 Pfund, die auf der Wagschale liegen, einer 100pfündigen auf der Brücke *A* liegenden Last das Gleichgewicht hält.

Die Figuren 51 bis 53 stellen die Brückenwage selbst dar, die Buchstaben

Fig. 51.

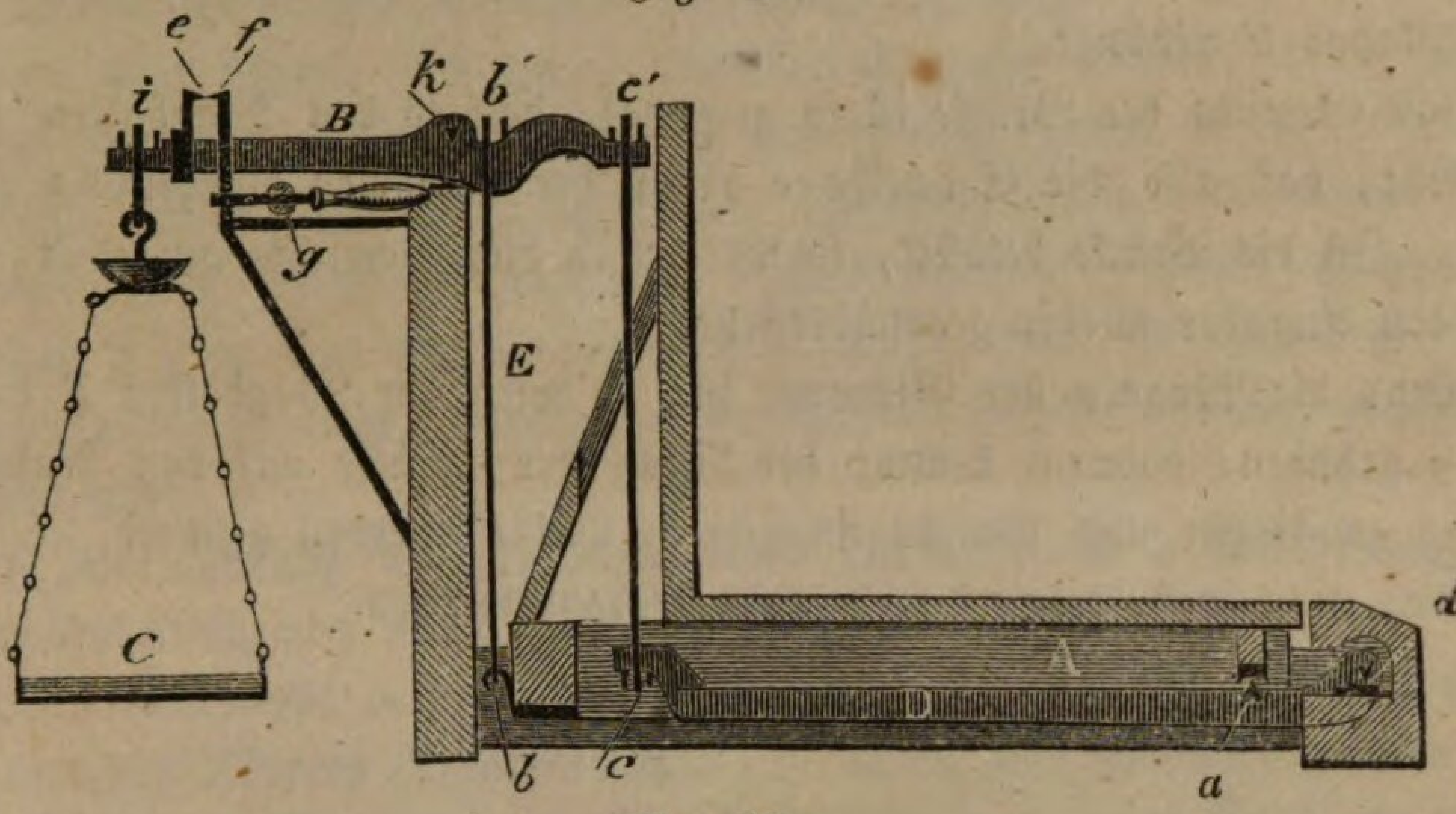


Fig. 52.

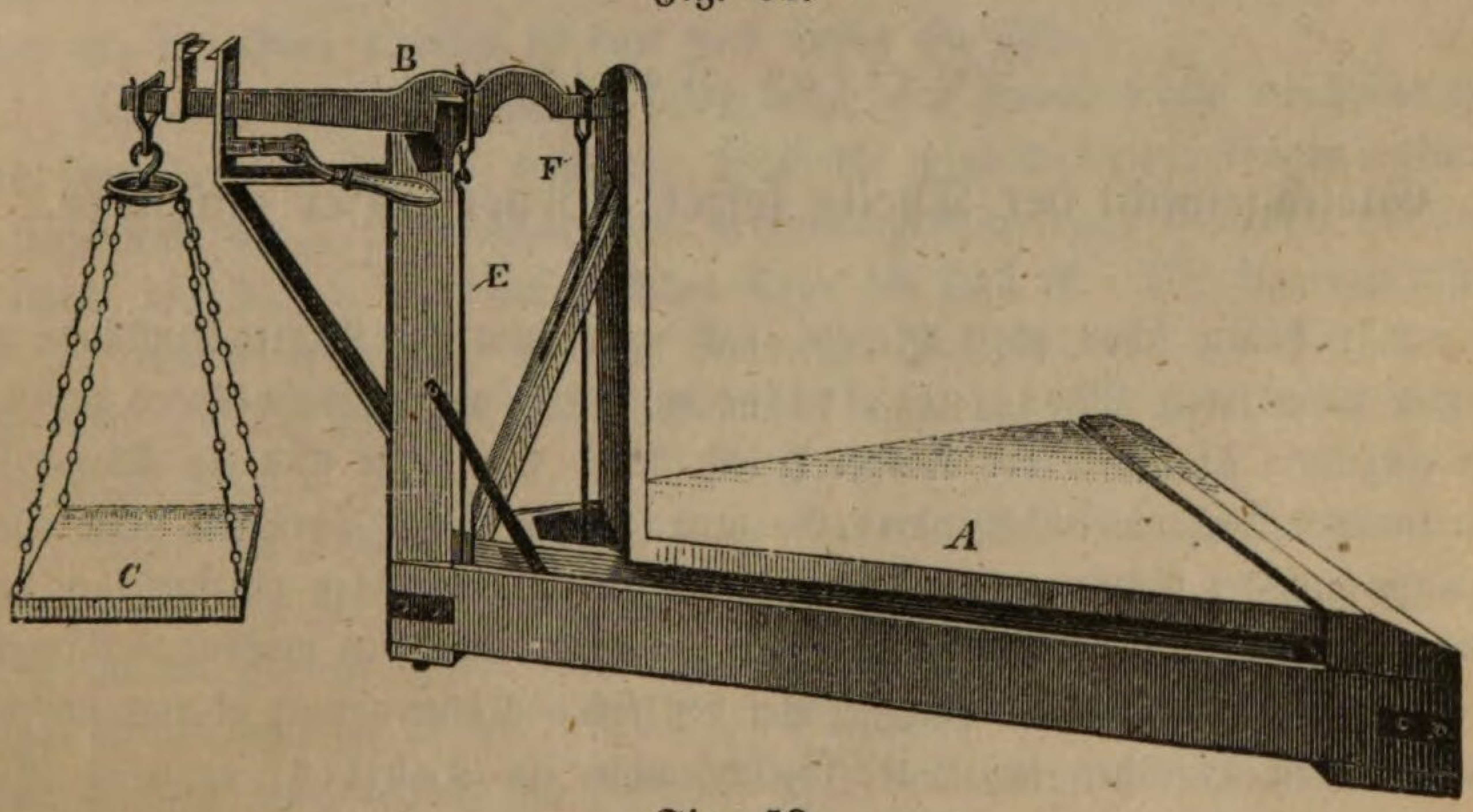
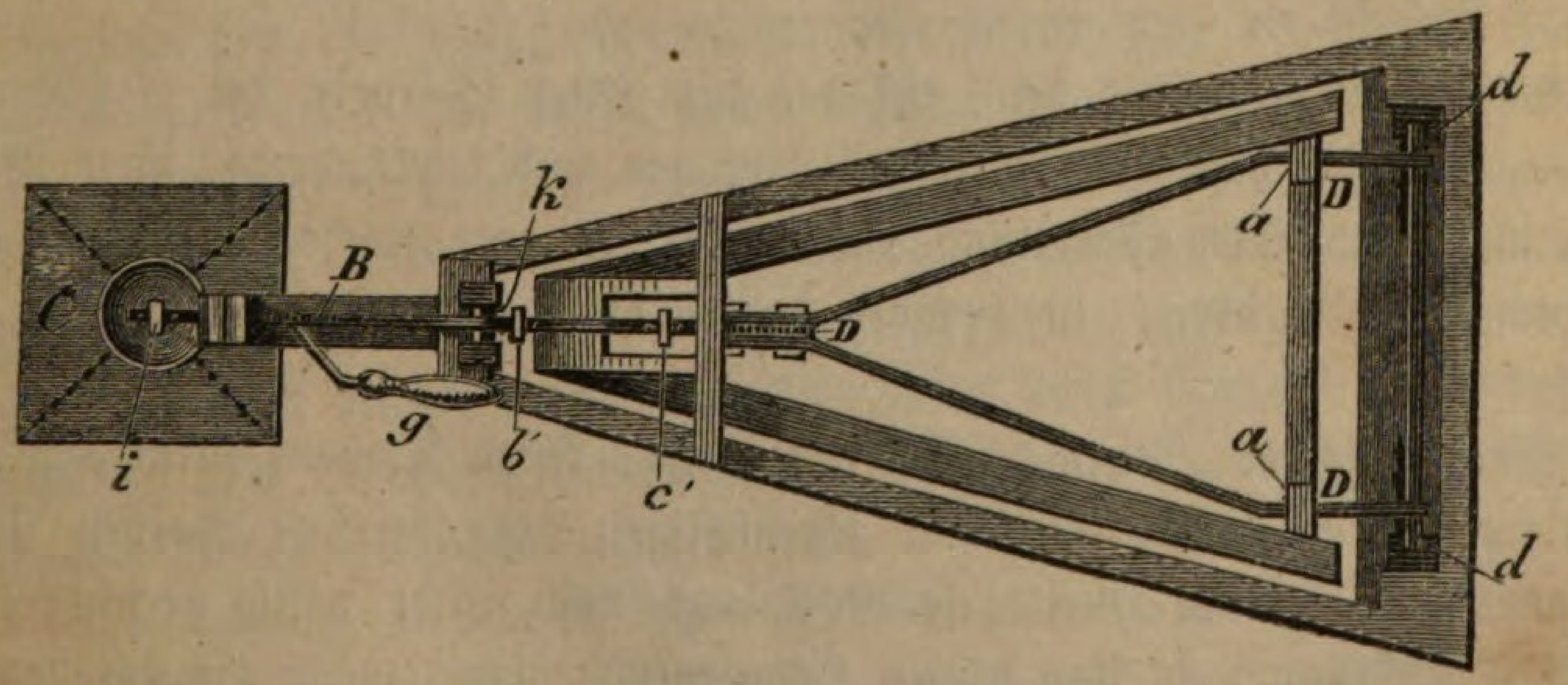


Fig. 53.



sind dieselben wie im Schema Fig. 50. Fig. 52 ist eine Ansicht; Fig. 51 ein

Durchschnitt; Fig. 53 der Grundriß der Brückenwage. Die Brücke *A* besteht aus einem starken Rahmen, der mit Brettern belegt und gewöhnlich auch mit Eisenblech beschlagen ist. Bei *a* ist sie mit einer Pfanne versehen und ruht auf den Schneiden des Hebels *D*; bei *b* hat sie einen Haken, in den die Zugstange *E* eingehängt ist. Der gabelförmige Hebel *D* ruht an einem Ende mit der Schneide *d* auf dem Gestelle der Brückenwage; das andere Ende ist bei *c* an die Zugstange *F* gehängt.

Das Gewicht der Brücke ist so geordnet, daß es den Wagbalken *B* wagerecht stellt, daß also die Schneide *e* genau der Schneide *f* gegenüber zu stehen kommt. Ist die Brücke belastet, so werden so viel Gewichte aufgelegt, daß die Schneiden einander wieder gegenüberstehen.

Wenn die Wage außer Gebrauch ist, so wird der Wagbalken *B* durch den Hebel *g* gehoben; dadurch kommt der Rand der Brücke auf den Rahmen des Gestelles zu liegen und die Zugstangen *E* und *F* werden gelüftet, so daß die Schneiden nicht mehr belastet sind, also geschont werden.

Zweites Kapitel.

Gleichgewicht der Theile fester Körper unter einander.

25 Wir haben schon oben gesehen, daß man, um die Aggregatzustände der Körper zu erklären, Molekularkräfte annimmt, welche fortwährend zwischen den einzelnen Theilchen der Körper thätig sind. So lange nun ein Körper seinen inneren Zustand nicht ändert, so lange die einzelnen Theilchen nicht allein in unveränderter Entfernung, sondern auch in unveränderter gegenseitiger Lage bleiben, müssen sich offenbar die zwischen einzelnen Theilchen wirkenden Molekularkräfte das Gleichgewicht halten. Bei den festen Körpern nun ist das zwischen den einzelnen Theilchen bestehende Gleichgewicht ein stabiles, denn es ist ja eine größere oder geringere Kraft nöthig, um diesen Gleichgewichtszustand zu stören.

Wie wir gesehen haben, ist bei den festen Körpern die Cohäsionskraft überwiegend, sie hält die Theilchen zusammen und wirkt sowohl ihrer Verschiebung als auch ihrer Trennung entgegen; um eine solche Verschiebung oder Trennung zu bewirken, ist deshalb immer eine größere oder geringere Kraft nöthig.

26 **Elasticität.** Wenn die Theilchen eines festen Körpers durch eine äußere Kraft wirklich ein wenig aus ihrer gegenseitigen Lage verrückt worden sind, so ist deshalb der frühere Gleichgewichtszustand noch nicht völlig vernichtet, denn die Theilchen können in ihre frühere Lage zurückkehren, wenn die störende Kraft zu wirken aufhört. Diese Eigenschaft der Körper, vermöge deren die Theilchen

in ihre frühere Gleichgewichtslage zurückkehren, wenn die durch äußere Kräfte veranlaßte Verschiebung gewisse Gränzen nicht überschritten hat, nennt man Elasticität. Die Elasticität der festen Körper beweis't, daß sich die Theilchen in einem stabilen Gleichgewichtszustande befinden, denn nur für den Fall des stabilen Gleichgewichts kehrt der Körper in seine Ruhelage zurück, wenn die Kräfte, welche ihn daraus entfernen, zu wirken aufhören.

Nicht alle Körper sind gleich elastisch; es giebt Körper, deren Theilchen selbst nach bedeutender Verschiebung doch wieder vollkommen in ihre frühere Lage zurückkehren, und solche Körper, wie z. B. Federharz (gummi elasticum), Stahl, Elfenbein u. s. w. werden vorzugsweise elastisch genannt; andere hingegen, wie Blei, Glas u. s. w. sind nur in geringem Grade elastisch, sie können keine große Verschiebung der Theilchen ertragen, ohne daß der frühere Gleichgewichtszustand aufgehoben wird.

Die Verschiebung der Theilchen kann entweder durch Spannung, durch Zusammendrückung oder durch Drehung hervorgebracht werden.

Wenn überhaupt eine große Kraft nöthig ist, um eine Verschiebung der Theilchen eines Körpers hervorzubringen, so nennt man ihn hart. Ein Körper kann hart und elastisch seyn, wie dies beim Elfenbein, beim Stahl u. s. w. der Fall ist; das Glas dagegen ist hart und wenig elastisch.

Ein Körper, dessen Theilchen schon durch eine geringe Kraft verschoben werden können, wird weich genannt. Auch die weichen Körper können entweder elastisch seyn, wie z. B. Federharz, oder nur einen sehr geringen Grad von Elasticität besitzen, wie dies z. B. beim feuchten Thon der Fall ist. Der Aggregatzustand solcher weichen mehr oder weniger breiartigen Körper kann gewissermaßen als ein Mittelzustand zwischen dem vollkommen festen und dem vollkommen flüssigen betrachtet werden.

Wenn die Theilchen eines Körpers über die Elasticitätsgränze hinaus verschoben werden, so hört entweder der Zusammenhang ganz auf oder die Theilchen ordnen sich zu einem neuen stabilen Gleichgewichtszustand. Im ersteren Falle nennt man die Körper spröde, im letzteren dehnbar. Die äußere Gestalt spröder Körper läßt sich durch Druck, durch Stoß u. s. w. nicht bleibend ändern, wenn durch diese äußeren Ursachen die Theilchen über eine gewisse Gränze verschoben werden, so erfolgt eine vollständige Trennung; die Gestalt dehnbarer Körper hingegen läßt sich durch solche mechanische Mittel bleibend verändern, wie dies z. B. das Prägen der Münzen beweis't.

Festigkeit. Die Kraft, mit welcher ein Körper der Trennung seiner 27
Theilchen widersteht, nennt man seine Festigkeit.

Der zwischen den einzelnen Theilchen eines festen Körpers stattfindende Zusammenhang läßt sich durch Zerreißen, durch Zerbrechen, durch Zerwinden (Abdrehen) oder durch Zerdrücken aufheben.

Absolute Festigkeit nennt man die Kraft, mit welcher ein Körper dem Zerreißen widersteht, wenn er der Länge nach angespannt wird. Dieser Widerstand hängt aber offenbar von dem Querschnitt des zu zerreißenden Kör=

pers ab, und zwar ist er diesem Querschnitt proportional, denn es muß ja der Zusammenhang von zwei-, drei-, viermal so viel Theilchen aufgehoben werden, wenn der Querschnitt eines Körpers zwei-, drei-, viermal so groß gemacht wird. Um nun die absolute Festigkeit verschiedener Materialien leicht mit einander vergleichen zu können, muß man irgend eine Einheit für diesen Querschnitt annehmen, und dann ermitteln, wie groß die Kraft ist, welche erfordert wird, um einen Körper, dessen Querschnitt dieser Einheit gleich ist, zu zerreißen. Wenn der Querschnitt des dem Versuche unterworfenen Körpers auch größer oder kleiner ist als der zur Einheit angenommene Querschnitt, so läßt sich doch die Festigkeit auf diesen reduciren.

Schon Muschenbroek hat zahlreiche Versuche über die absolute Festigkeit verschiedener Körper angestellt. Die folgende Tabelle giebt für verschiedene Körper das nach seinen Versuchen berechnete Gewicht an, welches nöthig ist, um einen Stab zu zerreißen, dessen Querschnitt 1 Quadratcentimeter beträgt.

Lindenholz	918	Kilogramm
Kiefernholz (Pinus sylvestris)	1021	»
Weißtanne (Pinus abies)	601 bis 929	»
Eichenholz	1150 bis 1466	»
Buchenholz	1349 bis 1586	»
Ebenholz	934	»
Kupferdraht	2782	»
Messingdraht	3550	»
Golddraht	4645	»
Bleidraht	272	»
Zinndraht	457	»
Silberdraht	3411	»
Eisendraht	4182	»
Glas, weißes	142 bis 233	»
Hanfseile	350 bis 620	»

Die große Verschiedenheit in der Festigkeit der Hanfseile rührt von der ungleichen Beschaffenheit des Materials her, aus denen sie verfertigt sind. Dünne Seile sind verhältnißmäßig stärker als dicke, weil sie aus besserem Hanf gedreht sind; durch starkes Drehen der einzelnen Fäden wird die Tragkraft der Seile bedeutend vermindert. Nasse Seile haben eine geringere Festigkeit als trockene.

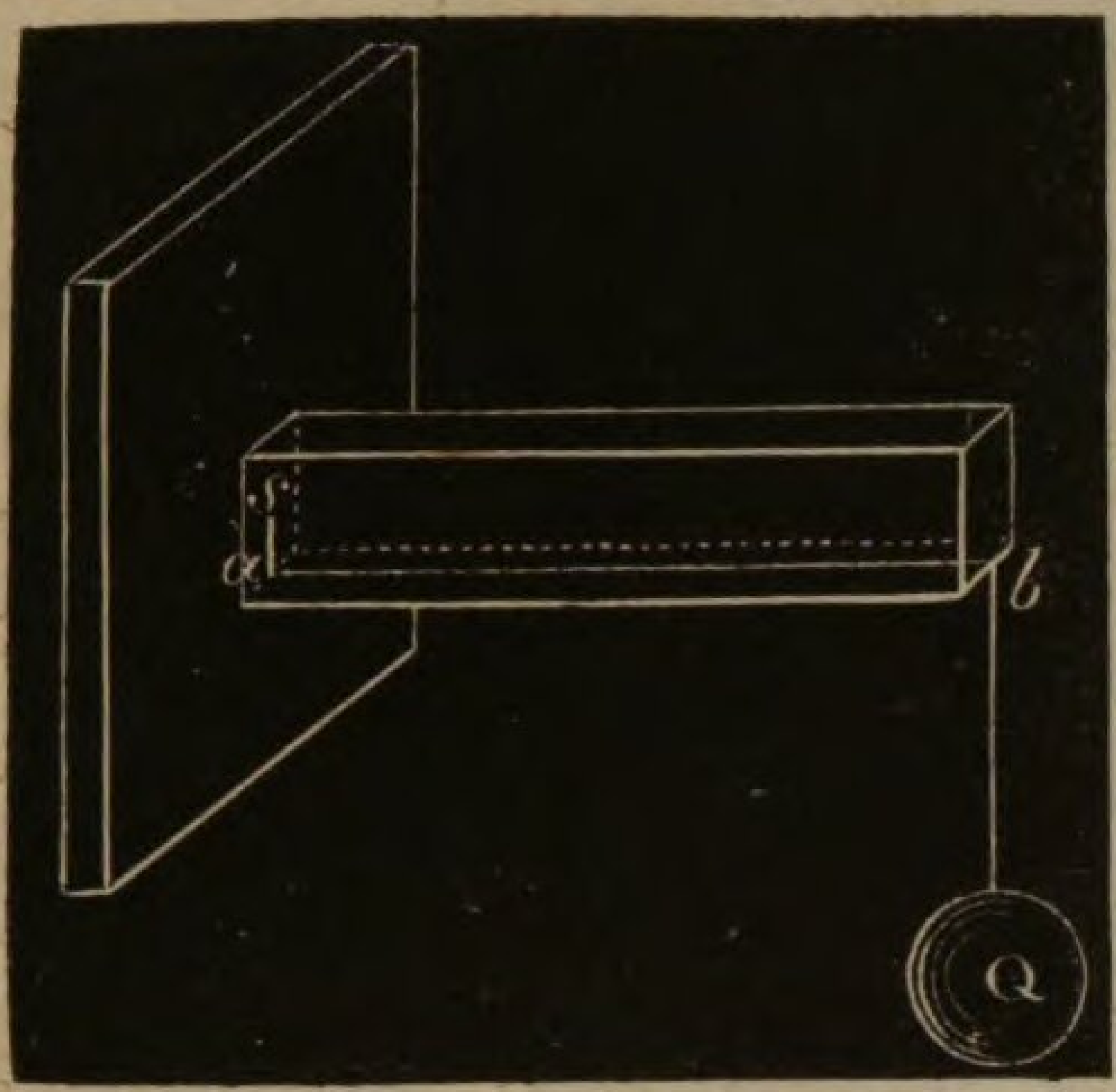
Bei praktischen Anwendungen wird man der Sicherheit wegen wohl thun, bei Metallen höchstens $1/2$, bei Hölzern nur $1/3$ der durch die Versuche ermittelten absoluten Festigkeit in Rechnung zu bringen.

Die Kraft, welche ein Körper dem Zerbrechen entgegensetzt, nennt man seine relative Festigkeit. Um einen Körper zu zerbrechen, muß die Kraft rechtwinklig zu der Richtung seiner Längenaxe angebracht seyn; der zu zerbrechende Körper ist entweder nur an einem, oder an zwei Enden unterstützt.

In Fig. 54 ist ein prismatischer Körper dargestellt, welcher mit dem einen

Ende in einer festen Wand steckt, während am anderen Ende das Gewicht Q angebracht ist, welches ihn zerbrechen soll. Bezeichnen wir die absolute Festigkeit, d. h. die Kraft, mit welcher der Körper einer in seiner Längenaxe wirkenden Kraft widersteht, die ihn zu zerreißen strebt, mit K, so können wir uns diese Kraft in dem Schwerpunkt s desjenigen Querschnitts vereinigt denken, welcher mit der Ebene der festen Wand zusammenfällt. Das Gewicht Q äußert nur ein Bestreben, den ganzen Körper um die untere Kante des Prismas zu drehen, sie wirkt also an dem Hebelarm ab, während der in s angebrachte Widerstand an dem Hebelarm as wirkt; wenn nun der Widerstand gerade der Kraft das Gleichgewicht halten soll, so muß sich der Widerstand K zur Kraft Q umgekehrt verhalten wie der Hebelarm as zum Hebelarm ab. Wenn die Höhe des Balkens mit h bezeichnet wird, so ist $as = \frac{1}{2} h$; bezeichnet man ferner die Länge ab mit l, so hat man

Fig. 54.



$$K : Q = l : \tfrac{1}{2} h$$

oder

$$Q = \frac{K \, . \, h}{2 \, l}.$$

Die Größe der Festigkeit K, mit welcher der Körper dem Zerreißen widersteht, hängt ab von dem Querschnitte des Balkens. Bezeichnen wir mit k die absolute Festigkeit für einen Querschnitt von 1 Quadratcentimeter, mit h die Höhe, mit b die Breite des Balkens, so ist

$$K = k \, b \, h,$$

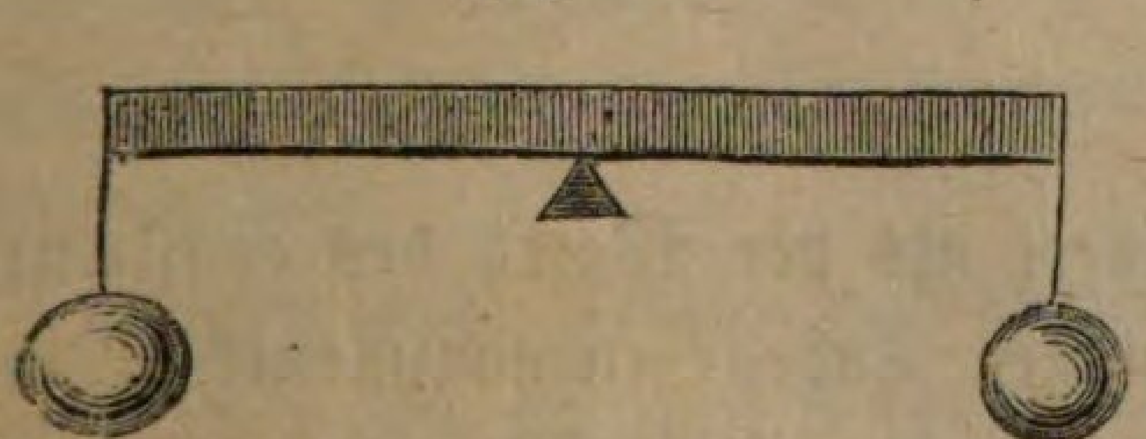
also

$$Q = \frac{k \, b \, h^2}{2 \, l}.$$

Aus dieser Formel sieht man, daß die zum Abbrechen nöthige Kraft im geraden Verhältniß der Breite und des Quadrats der Höhe wächst, sich aber umgekehrt verhält wie die Länge.

Wenn ein Balken in der Mitte seiner Länge durch eine scharfe Kante unterstützt und an seinen beiden Enden durch gleiche Gewichte P belastet ist, so werden diese ein Bestreben äußern, ihn in seiner Mitte zu zerbrechen, und zwar muß, um den Bruch wirklich herbeizuführen, das Gewicht P, welches an jedem Ende wirkt, doppelt so groß seyn als das Gewicht Q, welches man am Ende dessel-

Fig. 55.

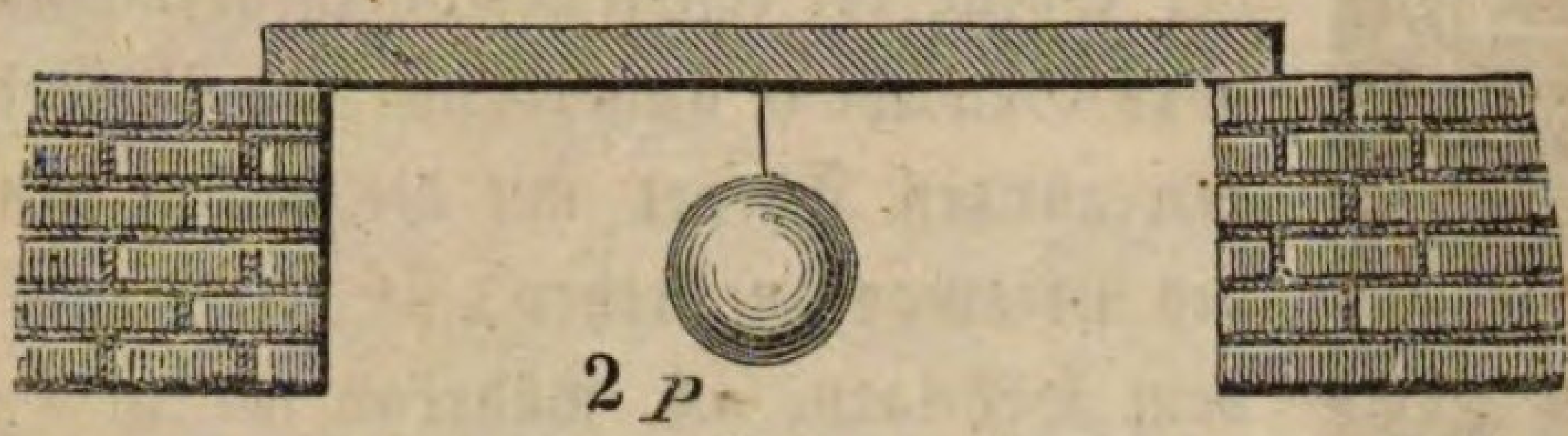


ben Balkens anbringen müßte, wenn er seiner ganzen Länge nach aus einer festen Wand hervorragte, wie Fig. 54, denn die Gewichte P wirken ja nur an einem halb so großen Hebelarm als das Gewicht Q.

Der Druck, den die Unterlage in der Mitte auszuhalten hat, ist offenbar $2\,P$.

Wäre der Balken an den beiden Enden unterstützt, wie Fig. 56, so kann man ihn dadurch zerbrechen, daß man eine Last $2\,P$ in der Mitte anhängt. Da nun $P = 2\,Q$, so muß man also, um einen an seinen beiden Enden unterstützten Balken zu zerbrechen, eine 4mal größere Kraft anwenden als die, welche man nöthig hat, um ihn abzubrechen, wenn er seiner ganzen Länge nach aus einer festen Wand hervorragt und die Kraft am freien Ende angebracht ist. Die in diesem Falle zum Zerbrechen nöthige Kraft ist demnach

Fig. 56.



$$4\,k\,\frac{b.\,h^2}{2\,l}.$$

Unter der Länge des Balkens ist natürlich im einen Fall der aus der Wand hervorragende Theil, im anderen Fall der zwischen den beiden Unterstützungspunkten liegende Theil zu verstehen.

Wir haben bei unseren bisherigen Betrachtungen und Rechnungen ganz unberücksichtigt gelassen, daß sich die Balken vor dem förmlichen Abbrechen erst biegen. Durch diese Biegung wird aber die relative Festigkeit bedeutend modificirt, so daß die nach obigen Formeln aus der bekannten absoluten Festigkeit berechneten Werthe der relativen Festigkeit von der Wirklichkeit bedeutend abweichen können. Wenn aber diese Formeln auch nicht dienen können, um die Größe der relativen Festigkeit direct zu berechnen, so dienen sie doch, um die relative Festigkeit von Balken und Stäben zu vergleichen, wenn sie aus demselben Material verfertigt und wenn nur ihre Dimensionen verschieden sind; denn wie auch durch die Biegsamkeit die Größe der absoluten Festigkeit modificirt werden mag, so ist sie doch stets der Breite und dem Quadrat der Höhe direct, der Länge aber umgekehrt proportional, in der Formel

$$Q = k\,\frac{b\,h^2}{2\,l}$$

wird also durch die Biegsamkeit nichts verändert als der Werth des constanten Factors k, für welchen man nicht den der obigen Tabelle entnommenen Werth der absoluten Festigkeit, sondern einen anderen für jedes Material durch die Erfahrung zu bestimmenden Factor setzen muß. Die Versuche zeigen, daß die Kraft, welche nöthig ist, um einen Balken zu zerbrechen, nahe 4mal kleiner

ist als die nach obiger Formel berechnete, wenn man für k den Zahlenwerth der absoluten Festigkeit setzt.

Welchen bedeutenden Einfluß die Biegsamkeit auf die relative Festigkeit ausübt, geht auch daraus hervor, daß, wenn ein Balken an seinen beiden Enden frei aufliegt, man, um ihn zu zerbrechen, in der Mitte nur ein halb so großes Gewicht anhängen muß, als wenn er an seinen beiden Enden so befestigt ist, daß er durchaus nicht nachgeben kann.

Bei Hölzern hat natürlich auch die Richtung der Fasern einen bedeutenden Einfluß auf die Festigkeit.

Den Widerstand, welchen ein Körper dem Zerdrücken entgegensetzt, nennt man, nach Eytelwein, die rückwirkende Festigkeit. Näheres über diesen für die Praxis so wichtigen Gegenstand findet man in Gerstner's Mechanik und in Eytelwein's Handbuch der Statik fester Körper.

Adhäsion. Dieselbe Kraft, welche die Theilchen eines festen Körpers zu- 28
sammenhält, wirkt auch, um die Theilchen zweier vorher getrennten Körper zusammenzuhalten, wenn man nur im Stande ist, sie in eine hinreichend innige Berührung zu bringen. So verbinden sich schon oft Spiegelplatten, welche nach dem Poliren dicht an einander gelegt worden sind, so innig mit einander, daß sie nicht mehr von einander getrennt werden können, ohne die Platten zu zerbrechen. Ebenso haften zwei Bleiplatten, die man zusammendrückt, fast so fest auf einander, als ob sie nur eine einzige Bleimasse ausmachten, vorausgesetzt, daß die Flächen, in welchen sich die beiden Bleistücke berühren, vollkommen eben und metallisch sind.

Dieses Aneinanderhaften zweier Körper wird mit dem Namen Adhäsion bezeichnet.

Die Adhäsion zeigt sich nicht allein zwischen gleichartigen, sondern auch zwischen verschiedenartigen Körpern. Eine Bleiplatte mit einer Zinnplatte oder eine Kupferplatte mit einer Silberplatte durch Glättwalzen gezogen, geben ein fast untrennbares Ganzes.

Besonders stark zeigt sich die Adhäsion verschiedenartiger Körper, wenn ein flüssiger Körper mit einem festen Körper in Berührung gebracht wird und dann durch Erkalten oder durch Verdunstung des Lösungsmittels fest wird; hierauf beruht das Zusammenkleben, das Leimen und Kitten. Kittet man vermittelst Siegellack zwei Glasstücke zusammen, so kommt es oft vor, daß sich beim Auseinanderreißen nicht das Glas vom Siegellack trennt, sondern daß Stücke aus dem Glase herausgerissen werden. Wenn man eine Glasplatte mit Leim bestreicht, so haftet dieser oft so fest am Glase, daß Stücke aus demselben (dem Glase) herausgerissen werden, wenn sich der Leim beim Austrocknen zusammenzieht.

Wenn zwei Körper mit ebenen Flächen auf einander liegen, und man den einen über den anderen hinausschieben will, so setzt die Adhäsion dieser Bewegung ein Hinderniß entgegen, die Adhäsion hat also einigen Antheil am Reibungswiderstand, der überall da überwunden werden muß, wo zwei Kör-

per übereinander hingleiten oder wo sich ein Körper über einen anderen hinwälzt. Von der Reibung wird noch weiter unten die Rede sein.

29 **Krystallisation.** Wenn ein Körper aus dem flüssigen oder gasförmigen Zustande in den festen Zustand übergeht, so ist es die nun das Uebergewicht erlangende Cohäsionskraft, welche die bis dahin beweglichen Theilchen in einer bestimmten gegenseitigen Lage fixirt. In der ganzen Natur zeigt sich aber bei diesem Uebergang in den festen Zustand ein Bestreben der Theilchen, eine regelmäßige Anordnung hervorzubringen. In der unorganischen Natur bewirkt dieses Bestreben die Krystallisation.

Krystalle nennt man solche feste Körper, welche sich in regelmäßigen, durch ebene Flächen begränzten Gestalten gebildet haben. In der Natur findet man eine Menge solcher Krystalle, z. B. Quarz (Bergkrystall), Kalkspath, Schwerspath, Topas, Granat u. s. w. werden oft sehr schön krystallisirt gefunden.

Wenn ein Körper aus dem flüssigen Zustand in den festen übergeht, so bilden sich fast immer Krystalle. Der Uebergang aus dem flüssigen in den festen Zustand findet entweder durch Erstarren eines geschmolzenen Körpers, oder durch Ausscheidung aus einer Auflösung Statt.

Wenn man geschmolzenes Wismuth in eine etwas erwärmte Schale gießt, so bildet sich nach einiger Zeit auf der Oberfläche eine feste Kruste. Wenn man nun diese Kruste durchsticht und das im Inneren noch flüssige Metall abgießt, so erhält man mehrere Linien große würfelförmige Krystalle, die das Innere der Höhlung ausfüllen, welche durch die zuerst erkaltete feste Kruste eingeschlossen wird.

Auf ähnliche Weise kann man auch Krystalle aus einer geschmolzenen Schwefelmasse erhalten.

Wenn man mit Aufmerksamkeit ein gefrierendes Wasser beobachtet, so sieht man, wie feine Eisnadeln sich bilden, wie sie von einem Augenblick zum anderen sich ausbreiten und verzweigen. Freilich sieht man hierbei selten so regelmäßige krystallinische Gestalten, wie man sie beim Schnee beobachtet, doch sieht man deutlich, daß die Eisbildung eine Krystallbildung ist.

Viele Körper lösen sich in Flüssigkeiten, namentlich in Wasser, auf, und zwar läßt sich in einer bestimmten Menge Wasser nur eine bestimmte Menge irgend eines Stoffes auflösen; doch lös't sich in warmem Wasser meistens mehr auf als in kaltem. Wenn nun eine Auflösung bei hoher Temperatur gesättigt ist, wenn man z. B. in einer bestimmten Menge warmen Wassers so viel Alaun aufgelös't hat als möglich, so kann diese Salzmasse nicht mehr ganz aufgelös't bleiben, wenn die Lösung erkaltet, ein Theil des Salzes wird sich wieder ausscheiden, und zwar schießt es in regelmäßigen Krystallen an. — Auch dann bilden sich Krystalle, wenn das Wasser einer gesättigten Lösung allmälig verdunstet.

Nicht allein aus wässerigen Lösungen scheiden sich Krystalle aus; der Schwefel z. B. lös't sich in Schwefelkohlenstoff, in Chlorschwefel, in Terpen-

tinöl auf, und aus diesen Lösungen kann man schöne durchsichtige Krystalle von Schwefel erhalten.

Die Krystalle werden um so größer und regelmäßiger, je langsamer die Erkaltung oder die Verdunstung vor sich geht. Bei schneller Krystallisation bilden sich kleine Krystalle, die sich zu unregelmäßigen Gruppen zusammenhäufen, an denen man oft kaum ein krystallinisches Gefüge erkennen kann.

Jedem Stoff kommt eine eigenthümliche Krystallform zu; so ist z. B. die Krystallform des Bergkrystalls eine andere als die des Alauns, und diese wieder eine andere als die des Kupfervitriols.

Die Untersuchung der Symmetriegesetze, welche zwischen den einzelnen Krystallflächen stattfinden, so wie die Beschreibung der Krystallformen überhaupt, ist ein Gegenstand, mit welchem sich die Krystallographie zu beschäftigen hat.

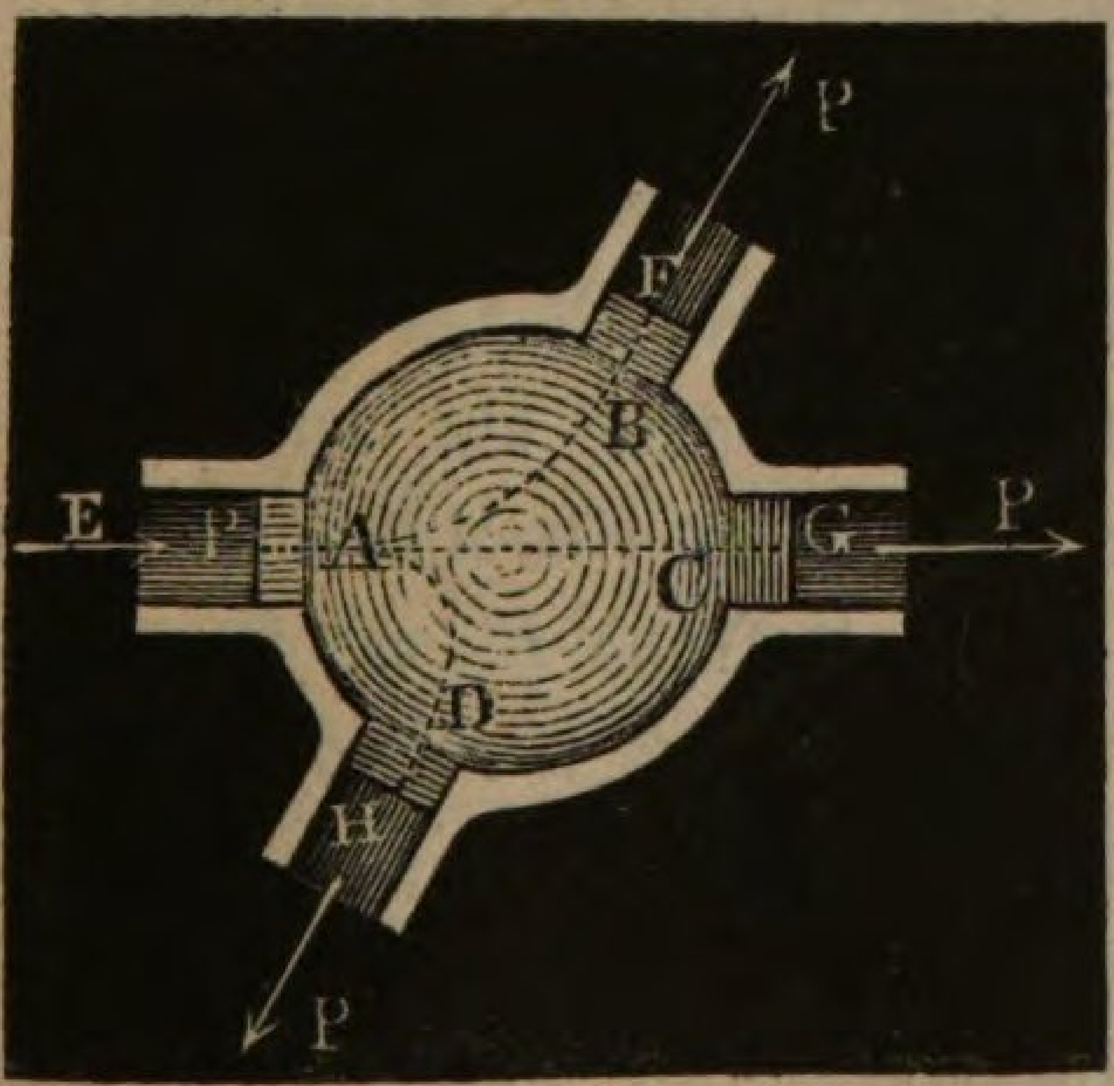
Drittes Kapitel.

Hydrostatik oder die Lehre vom Gleichgewicht der Flüssigkeiten.

Princip der Gleichheit des Drucks. Flüssigkeiten haben in Folge der leichten Verschiebbarkeit der Theilchen die Eigenschaft, daß sie jeden Druck, welcher auf einen Theil ihrer Oberfläche ausgeübt wird, nach allen Seiten gleichmäßig fortpflanzen. 30

Es sey in Fig. 57 der horizontale Durchschnitt eines ganz mit Wasser gefüllten und vollkommen verschlossenen Gefäßes dargestellt, an welchem sich in gleicher Tiefe unter der Oberfläche des Wassers 4 vollkommen gleiche Röhren befinden, die durch Kolben verschlossen sind. Da diese Kolben gleichen Durchmesser haben und gleich tief unter dem Wasserspiegel liegen, so haben sie auch vollkommen gleichen Druck durch die Schwere des Wassers auszuhalten, einen Druck, von welchem wir vor der Hand ganz absehen, den wir also als nicht vorhanden betrachten wollen.

Fig. 57.

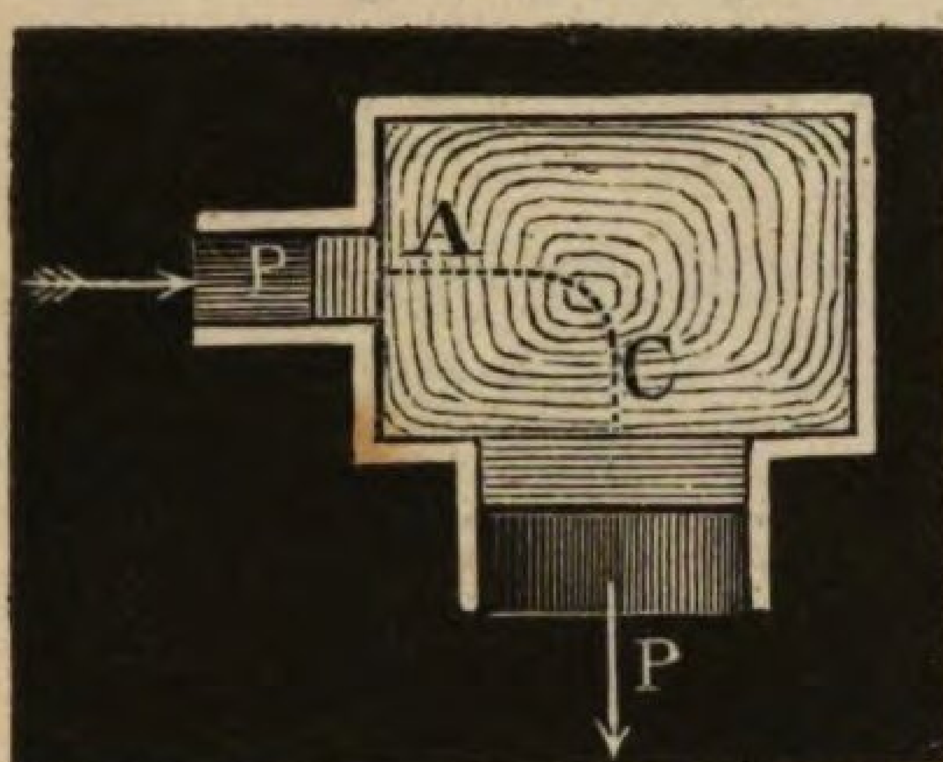


Wird nun durch irgend eine Kraft einer der Kolben, etwa A, nach Innen gedrückt, so pflanzt sich dieser

Druck durch das Wasser hindurch auf die übrigen Kolben fort, und man müßte, um zu verhindern, daß diese Kolben herausgedrückt werden, auf jeden derselben einen nach Innen gerichteten Gegendruck anbringen, welcher vollkommen dem auf den Kolben *A* wirkenden Drucke gleich ist; das Gleichgewicht kann also nur dann bestehen, wenn alle 4 Kolben durch ganz gleiche Kräfte nach Innen gedrückt werden.

Der Druck pflanzt sich jedoch nicht allein vom Kolben *A* auf die übrigen Kolben, sondern auf alle Theile der Gefäßwand fort, so daß jeder Flächentheil der Gefäßwand, welcher eben so groß ist, wie der Querschnitt des Kolbens, auch einen eben so großen Druck auszuhalten hat.

Fig. 58.



In Fig. 58 ist der Durchschnitt eines ähnlichen Gefäßes mit zwei Röhren dargestellt, welche gleichfalls mit Kolben geschlossen seyn sollen; die Röhren und folglich auch der Querschnitt der Kolben sind aber nicht gleich. Es sey z. B. die Oberfläche des Kolbens *C* 4mal so groß als die des Kolbens *A*, so wird, wenn irgend eine Kraft gegen den Kolben *A* drückt, der Gesammtdruck auf den Kolben *C* auch 4mal so groß sein, als der auf *A* wirkende, weil jedes Flächenstück des Kolbens *C*, welches der Oberfläche des Kolbens *A* gleich ist, einen eben so großen Druck auszuhalten hat als *A*.

Wenn man also den Kolben *A* mit einer Kraft von 10 Pfund nach innen drückt, so müßte man zur Erhaltung des Gleichgewichts an dem Kolben *C* einen nach innen gerichteten Druck von 40 Pfund anbringen.

Der Druck pflanzt sich nicht allein in einer Horizontalebene fort, wie dies in den bisher betrachteten Beispielen der Fall war, sondern auch nach oben und nach unten.

Fig. 59.

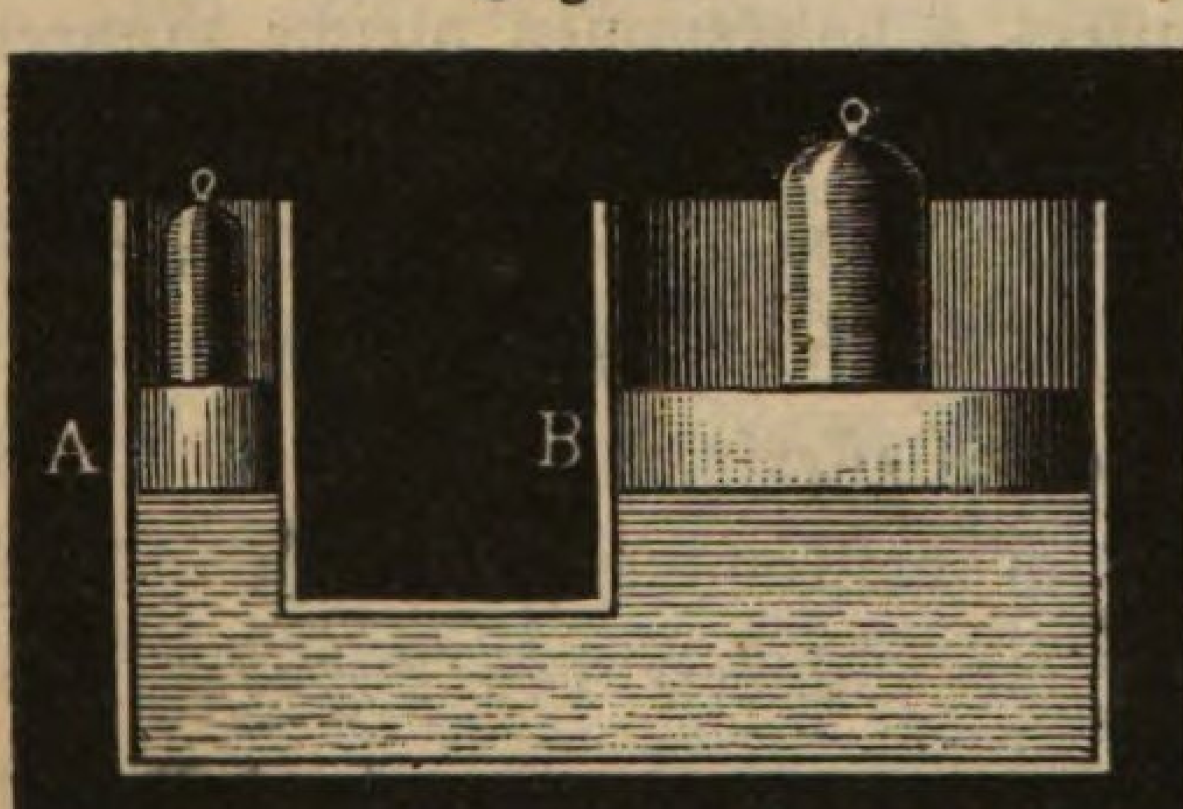


Fig. 59 stelle den vertikalen Durchschnitt zweier unten verbundener, mit Wasser gefüllter Röhren dar, welche ungleichen Querschnitt haben. In jeder Röhre sey ein schließender Kolben auf das Wasser gesetzt. Wenn nun auf den Kolben *A*, dessen Querschnitt 10mal kleiner seyn mag, als der des Kolbens *B*, ein Gewicht von 12 Pfund aufgelegt wird, so wird sich der Druck in der Weise bis zum Kolben *B* fortpflanzen, daß gegen jedes Flächenstück von *B*, welches eben so groß ist als der Querschnitt von *A*, ein nach oben gerichteter Druck von 12 Pfund wirkt, man müßte also den Kolben *B* mit 120 Pfund belasten, wenn das Gleichgewicht ungestört bleiben soll.

Auf der gleichförmigen Fortpflanzung des Druckes durch Flüssigkeiten beruht die **hydraulische Presse**; sie besteht aus zwei Haupttheilen, einer Saug- und Druckpumpe, welche den Druck ausübt, und einem Kolben mit einer Platte, welche den Druck empfängt, um ihn auf den zu pressenden Körper zu übertragen. Fig. 60 ist ein Durchschnitt, Fig. 61 eine Totalansicht der hydraulischen Presse

Fig. 60.

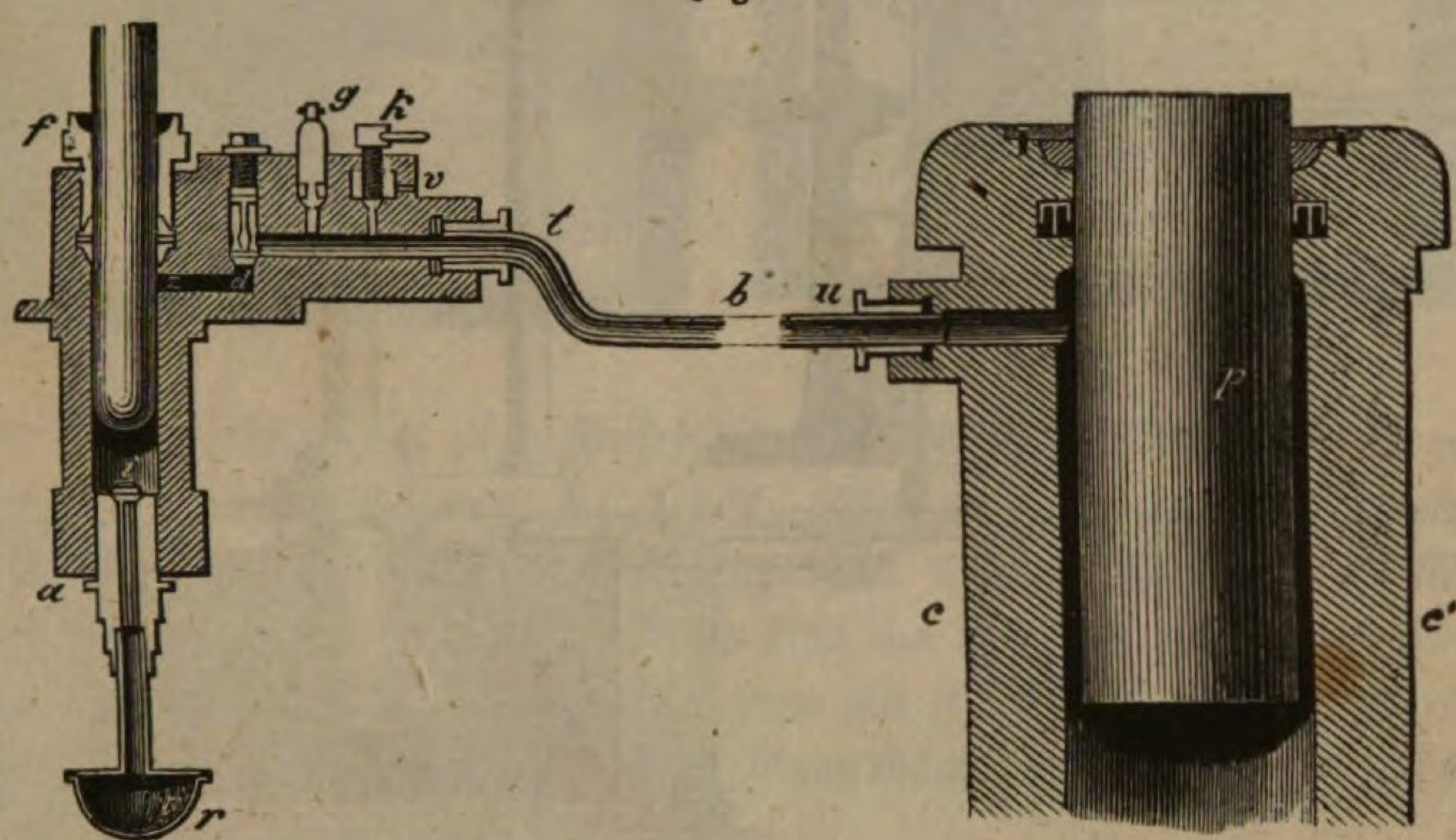
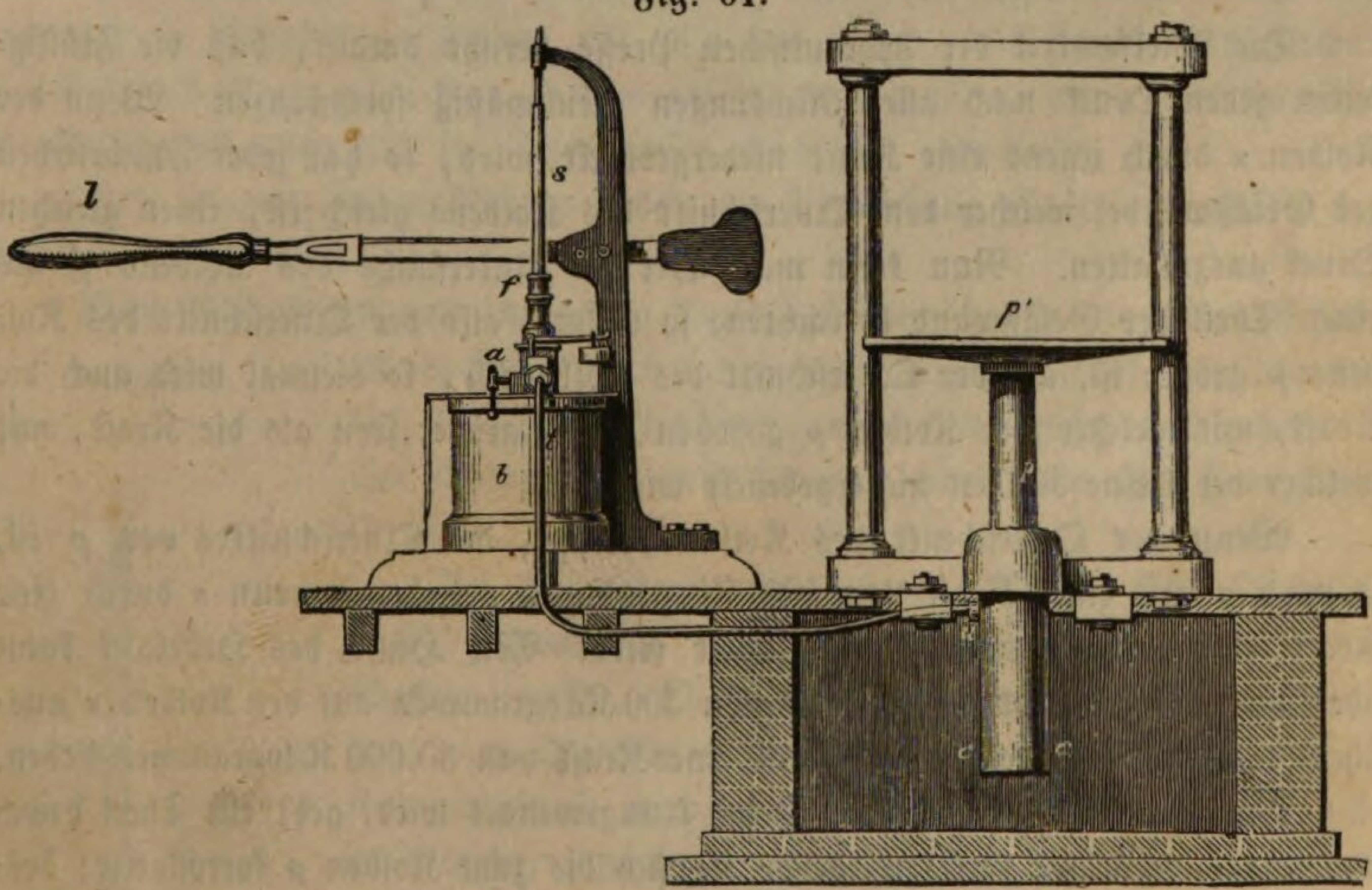


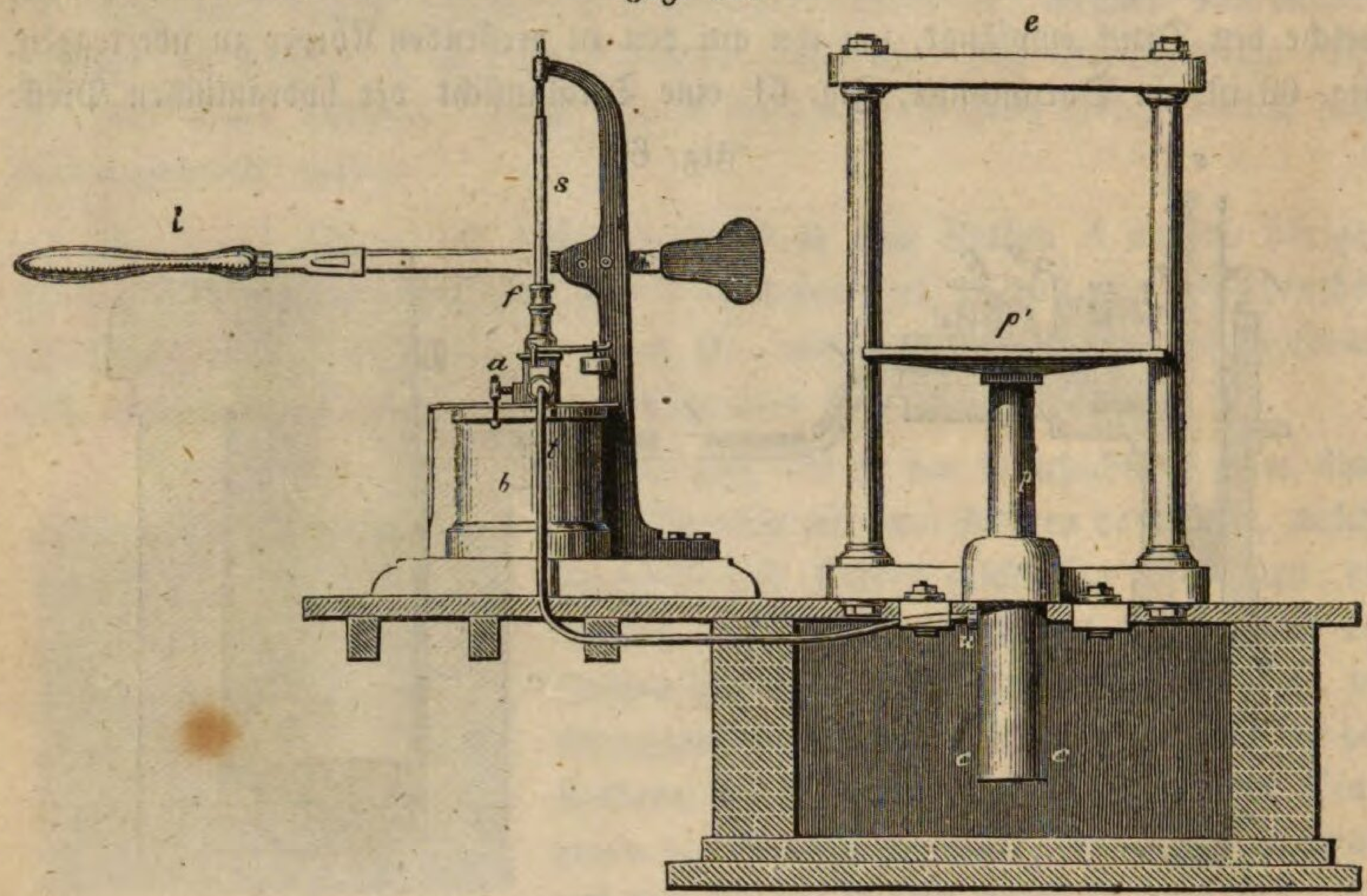
Fig. 61.



in kleinerem Maßstabe. Durch den Hebel *l* wird der Kolben *s* gehoben, das Wasser des Behälters *b* dringt durch das Sieb *r*, hebt das Ventil *i* und gelangt so unter den Kolben *s*. Wenn man den Hebel *l* niederdrückt, so geht auch der Kolben *s* nieder, das zurückgetriebene Wasser schließt das Ventil *i*, hebt das Ventil *d* und gelangt durch die Röhre *t b u* in den Cylinder *c c'* der Presse; hier drückt es nun gegen den Kolben *p*, den es mit der Platte *p'* hebt, und

so wird der zu pressende Körper zwischen p' und der festen Platte e zusammengedrückt.

Fig. 62.



Die Wirksamkeit der hydraulischen Presse beruht darauf, daß die Flüssigkeiten jeden Druck nach allen Richtungen gleichmäßig fortpflanzen. Wenn der Kolben s durch irgend eine Kraft niedergedrückt wird, so hat jeder Flächentheil der Gefäßwände, welcher dem Querschnitt des Kolbens gleich ist, einen gleichen Druck auszuhalten. Nun kann man aber die Unterfläche des Kolbens p als einen Theil der Gefäßwand betrachten; so vielmal also der Querschnitt des Kolbens p größer ist, als der Querschnitt des Kolbens s, so vielmal wird auch die Kraft, mit welcher der Kolben p gehoben wird, größer seyn als die Kraft, mit welcher der kleine Kolben niedergedrückt wird.

Wenn der Querschnitt des Kolbens s $^1/_{100}$ des Querschnittes von p ist, so wird p mit einer Kraft von 100 Kilogrammen gehoben, wenn s durch eine Kraft von 1 Kilogramm niedergedrückt wird. Mit Hülfe des Hebels l kann aber ein Mensch leicht einen Druck von 300 Kilogrammen auf den Kolben s ausüben und also auch den Kolben p mit einer Kraft von 30,000 Kilogrammen heben.

Von der Kraft, welche am Hebel l angewendet wird, geht ein Theil durch Reibungswiderstände verloren, bevor sie sich bis zum Kolben p fortpflanzt; deshalb wird der Effect stets geringer seyn, als er nach den eben angeführten Betrachtungen seyn sollte.

31 **Communicirende Gefäße.** Denken wir uns in der Figur 63 die Kolben A und B bis an das untere Ende der vertikalen Cylinder herabgerückt und ihre Dicke bis auf Null reducirt, oder denken wir uns statt der Kolben nur Wasserschichten, so werden doch die Gleichgewichtsbedingungen unverändert dieselben bleiben. Wenn auf die Schicht $A\,C$, Fig. 64, irgend ein gleichförmiger

Druck ausgeübt wird, so findet das Gleichgewicht nur dann Statt, wenn auf die *n*mal größere Schicht *BD* ein auch ein *n*mal größerer Druck wirkt. Wird

Fig. 63.

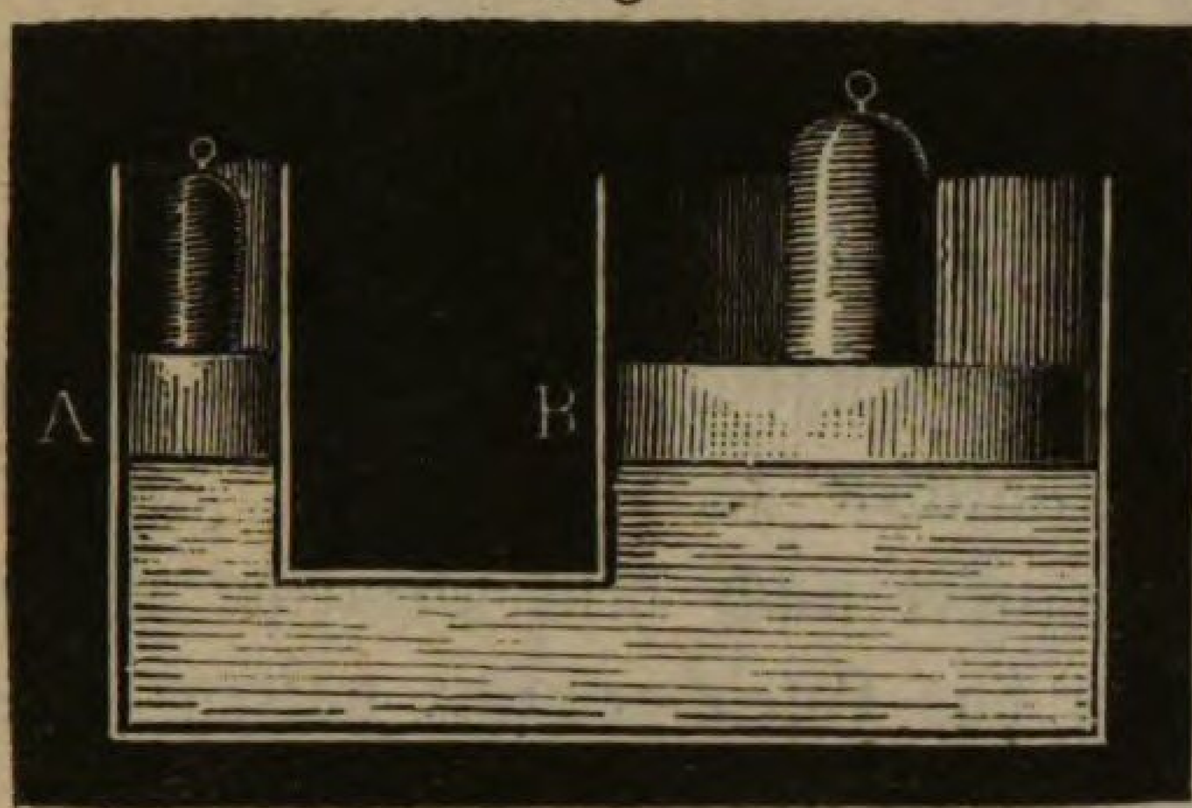
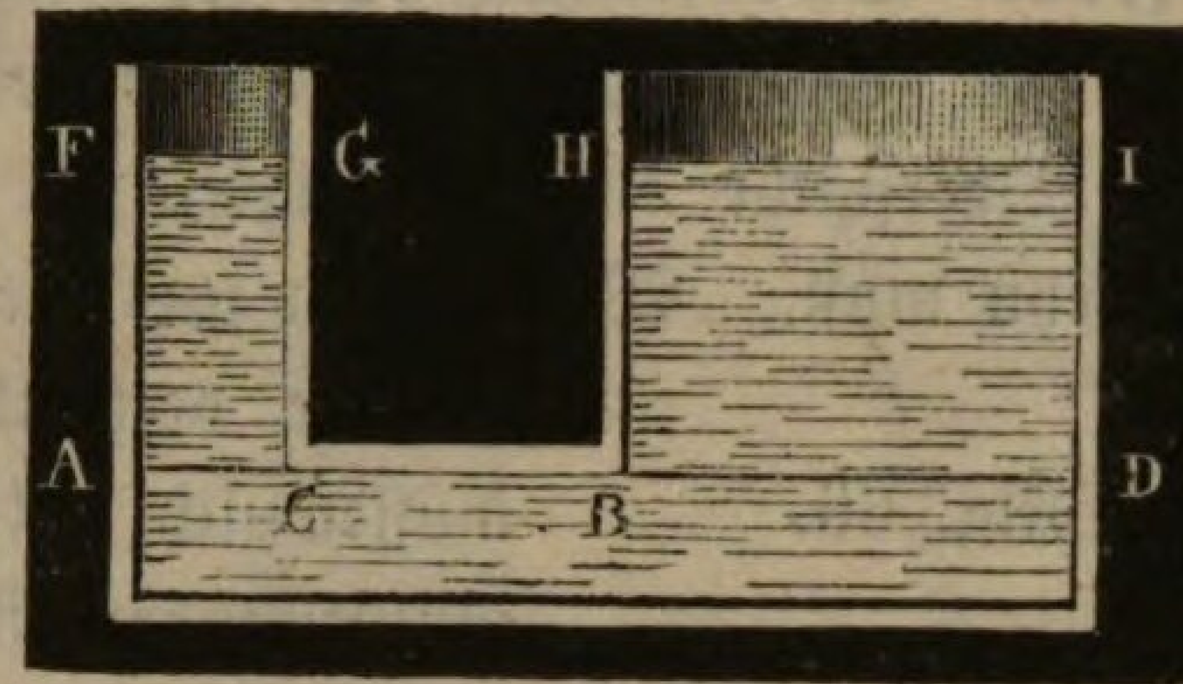


Fig. 64.



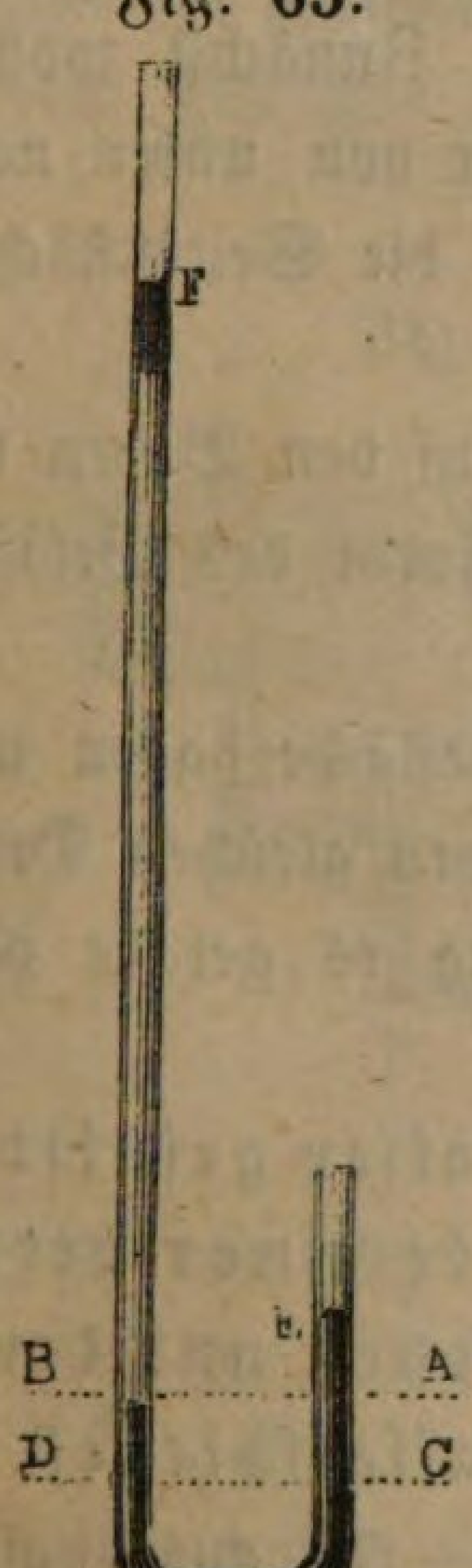
auf die Wasserschicht *AC* eine Wassersäule *ACFG* aufgeschüttet, so ist es das Gewicht derselben, welches auf *AC* drückt. Will man diesem Druck durch eine auf *BD* lastende Wassersäule das Gleichgewicht halten, so muß diese Wassersäule *BDHJ* nothwendig *n*mal so schwer seyn als *ACFG*. Soll aber die Wassersäule *BDHJ* wirklich *n*mal schwerer seyn als *ACFG*, so müssen beide Wassersäulen gleiche Höhe haben, da ja die Grundfläche *BD* schon *n*mal größer ist als *AC*.

Für cylindrische vertikale Röhren, die unten auf irgend eine Weise mit einander in Verbindnng stehen, gilt also das Gesetz, daß sie mit der gleichen Flüssigkeit **bis zu gleicher Höhe** gefüllt seyn müssen, wenn Gleichgewicht stattfinden soll, mag nun ihr Durchmesser gleich seyn oder nicht.

Nur bei ganz engen Röhren findet eine Abweichung Statt, die später besprochen werden wird.

Sind Flüssigkeiten von ungleichem specifischen Gewichte in die beiden Schenkel gegossen, so sind natürlich die Flüssigkeitssäulen, welche sich das Gleichgewicht halten, nicht mehr gleich hoch, sondern ihre Höhen verhalten sich umgekehrt wie ihre specifischen Gewichte.

Fig. 65.



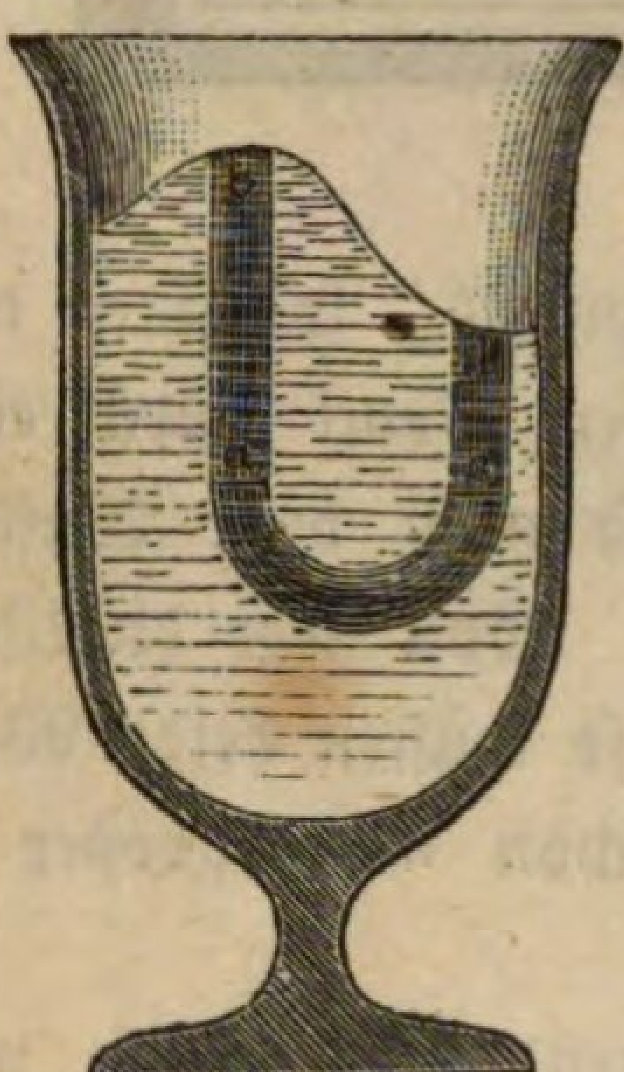
In die heberförmig gebogene Röhre, Fig. 65, sey z. B. Quecksilber und dann in den längeren Schenkel Wasser gegossen. Denken wir uns durch die Berührungsstelle von Quecksilber und Wasser eine horizontale Ebene *BA* gelegt, so wird alles Quecksilber unter *BA* für sich im Gleichgewicht seyn, die Höhe der Quecksilbersäule von *E* bis zur Ebene *BA* ist aber für den Fall des Gleichgewichts beinahe 14mal geringer als die Höhe der Wassersäule im anderen Schenkel, weil das specifische Gewicht des Quecksilbers nahe 14mal so groß ist als das des Wassers.

Was man nun auch für verschiedene Flüssigkeiten anwenden mag, immer müssen sich die Höhen der Säulen umgekehrt wie ihre specifischen Gewichte verhalten. So hält

z. B. eine 8 Zoll hohe Säule von concentrirter Schwefelsäure einer Wassersäule von 14,8 Zollen, und eine 8 Zoll hohe Säule von Schwefeläther einer Wassersäule von 5,7 Zollen das Gleichgewicht.

32 **Freie Oberfläche der Flüssigkeiten.** Aus dem Satze, welcher zu Anfang des vorigen Paragraphen bewiesen wurde, geht nun auch hervor, daß die freie Oberfläche einer Flüssigkeit in irgend einem Gefäße nothwendig horizontal seyn muß. Wir können uns die ganze Flüssigkeitsmasse in eine beliebige Menge vertikaler Säulchen zerlegt denken und diese müssen sich unter einander nach dem Principe der communicirenden Röhren das Gleichgewicht halten. Hätte z. B. die Oberfläche der Flüssigkeit die Gestalt der Fig. 66, so könnten sich unmöglich die Wassersäulen *cd* und *ab*, welche zur Unterscheidung von der übrigen Wassermasse stärker schraffirt sind, das Gleichgewicht halten; es muß nothwendig ein Sinken der höheren und ein Steigen der niedrigeren erfolgen bis die ganze Oberfläche rechtwinklig ist zur Richtung der Schwere.

Fig. 66.



Wenden wir dies auf die Oberfläche des Meeres an, welches wir als vollkommen ruhig betrachten wollen, so ist klar, daß, wenn die Schwerkraft allein wirkt und wenn sie stets nach dem Mittelpunkt der Erde gerichtet ist, die Oberfläche aller Meere Theile einer Kugeloberfläche seyn müssen.

33 **Bodendruck der Flüssigkeiten.** Wenn flüssige Massen in Gleichgewicht sind, so üben sie, in Folge ihrer Schwere, einen mehr oder minder bedeutenden Druck auf den Boden und die Seitenwände der Gefäße aus, in denen sie enthalten sind, dessen Werth wir nun bestimmen wollen. Zunächst wollen wir den Druck untersuchen, welcher von oben nach unten, oder von unten nach oben auf horizontale Flächen, alsdann den Druck, welcher auf die Seitenflächen ausgeübt wird.

Der Druck, den eine Flüssigkeit von oben nach unten auf den Boden des Gefäßes ausübt, in welchem sie enthalten ist, ist von der Form des Gefäßes ganz unabhängig.

In Gefäßen, die, wie in Fig. 67 — 70, gleiche Grundfläche haben und bis zu gleicher Höhe mit Wasser gefüllt sind, hat also der Boden gleichen Druck auszuhalten, mag nun das Gefäß oben weit oder eng, mag es gerade oder schräg seyn.

Der Druck, welchen der Boden eines mit Wasser gefüllten Gefäßes auszuhalten hat, ist gleich dem Gewichte einer vertikalen Wassersäule, deren Basis gleich ist jenem Boden und deren Höhe gleich ist der Tiefe des Bodens unter dem Wasserspiegel.

Der Druck, welchen der Boden der Gefäße Fig. 67 — 70 auszuhalten

haben, ist also gleich dem Gewichte der im Gefäß Fig. 68 enthaltenen Wassersäule.

Fig. 67.

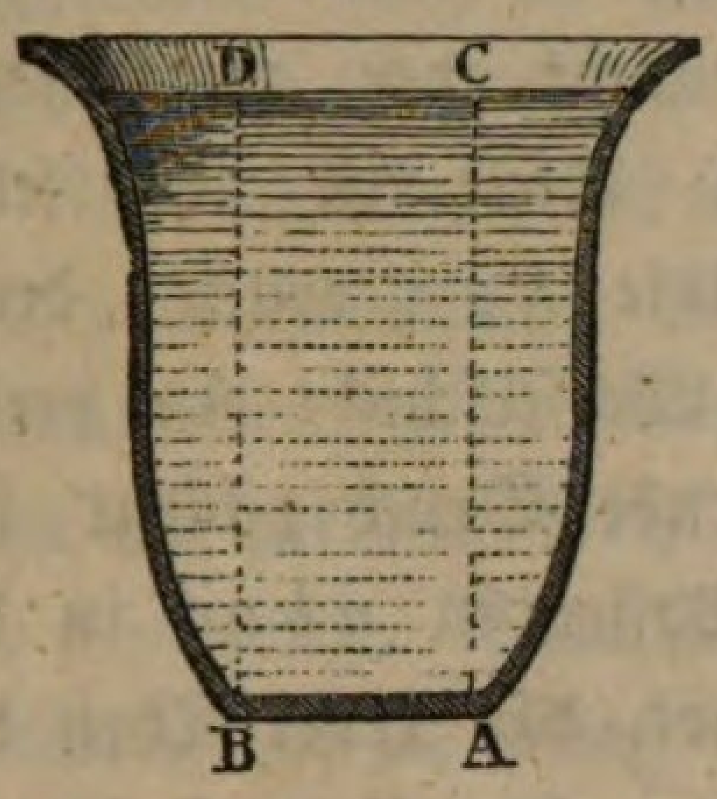


Fig. 68.



Fig. 69

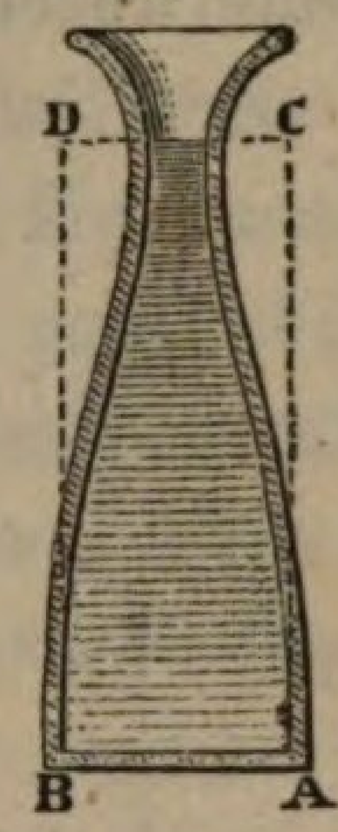
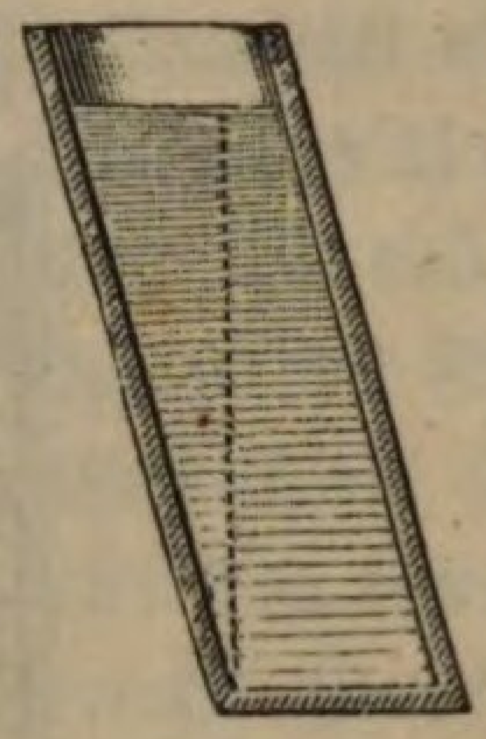


Fig. 70.



Wenn man allgemein mit s den Flächeninhalt des Bodens, den man betrachtet, mit h die Höhe des Spiegels und mit d das Gewicht der Raumeinheit der Flüssigkeit bezeichnet, so ist der Druck auf die Fläche s gleich $s \,.\, h \,.\, d$. Ist z. B. der Flächeninhalt des Bodens 3 □' die Höhe des Wasserspiegels über dem Boden 4', so ist der Druck auf den Boden $3 \times 4 \times 66$ Pfund, da der Kubikfuß Wasser 66 Pfund wiegt und die vertikale Wassersäule $3 \,.\, 4 = 12$ Kubikfuß hält.

Daß der Druck auf den Boden eines geraden cylindrischen Gefäßes, wie Fig. 68, gleich dem Gewicht des darin enthaltenen Wassers ist, bedarf keines Beweises; daß aber der Druck auf den Boden der oben erweiterten, verengten und schrägen Gefäße derselbe ist, soll noch bewiesen werden.

Fig. 71 stellt ein Gefäß vor, welches sich in treppenförmigen Absätzen nach oben erweitert. Hier ist nun klar, daß das Bodenstück pq nur die Last der Wassersäule $pqem$ zu tragen hat, während das Gewicht der Wassermassen, welche die genannte Wassersäule umgeben, durch den Boden der treppenförmigen Absätze getragen wird. Das Gleiche gilt auch für das Gefäß Fig. 72, dessen

Fig. 71.

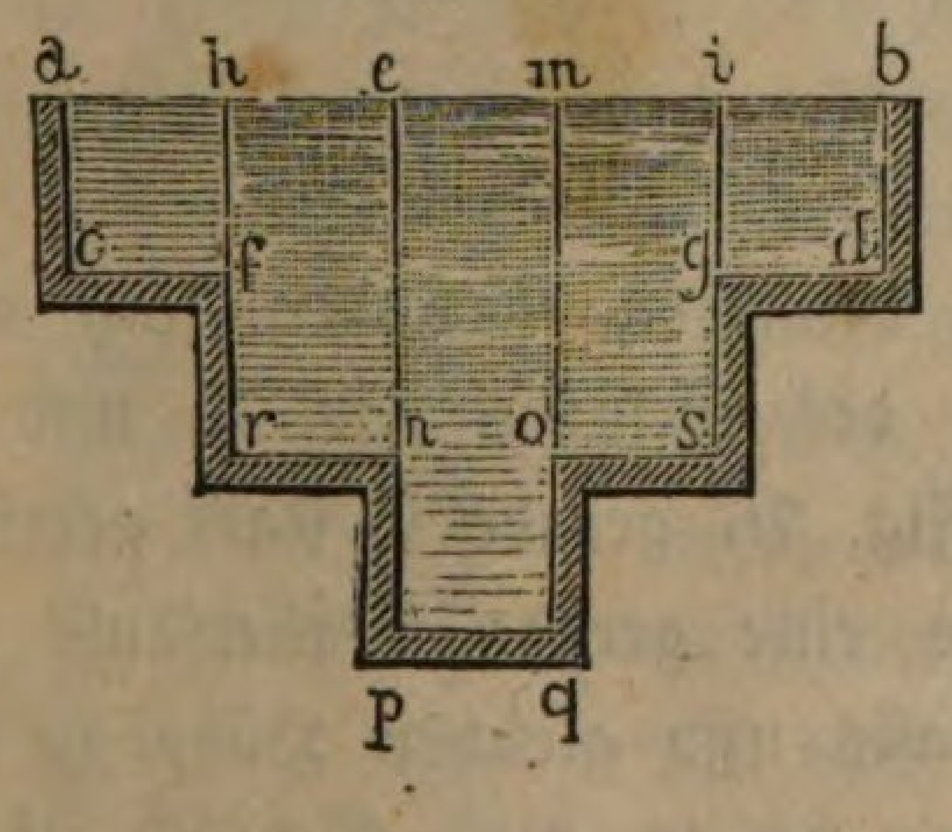
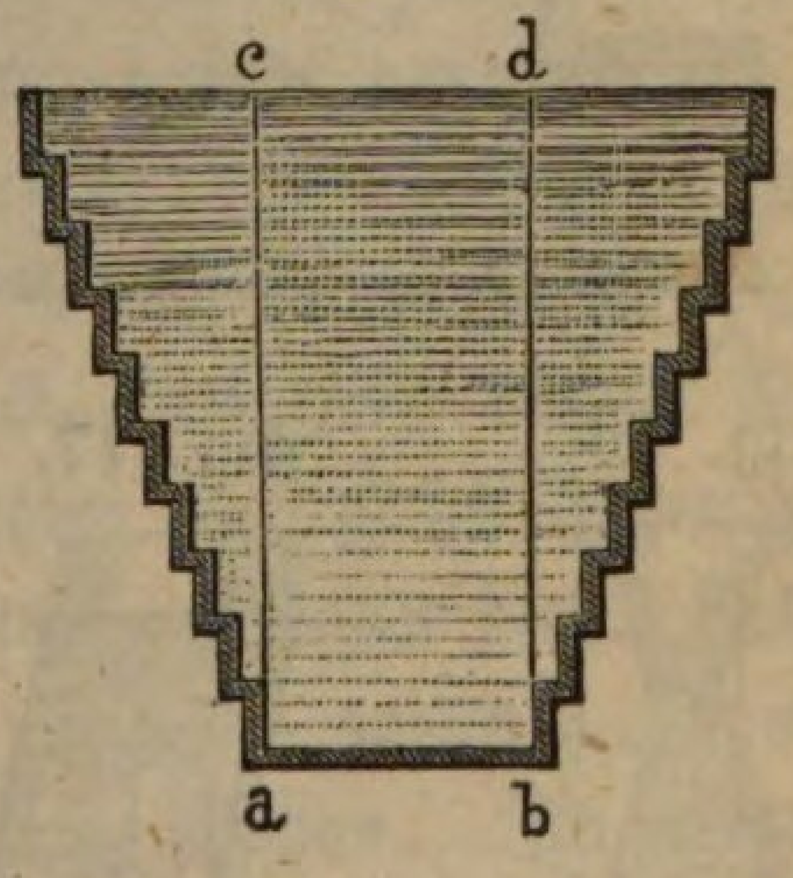


Fig. 72.



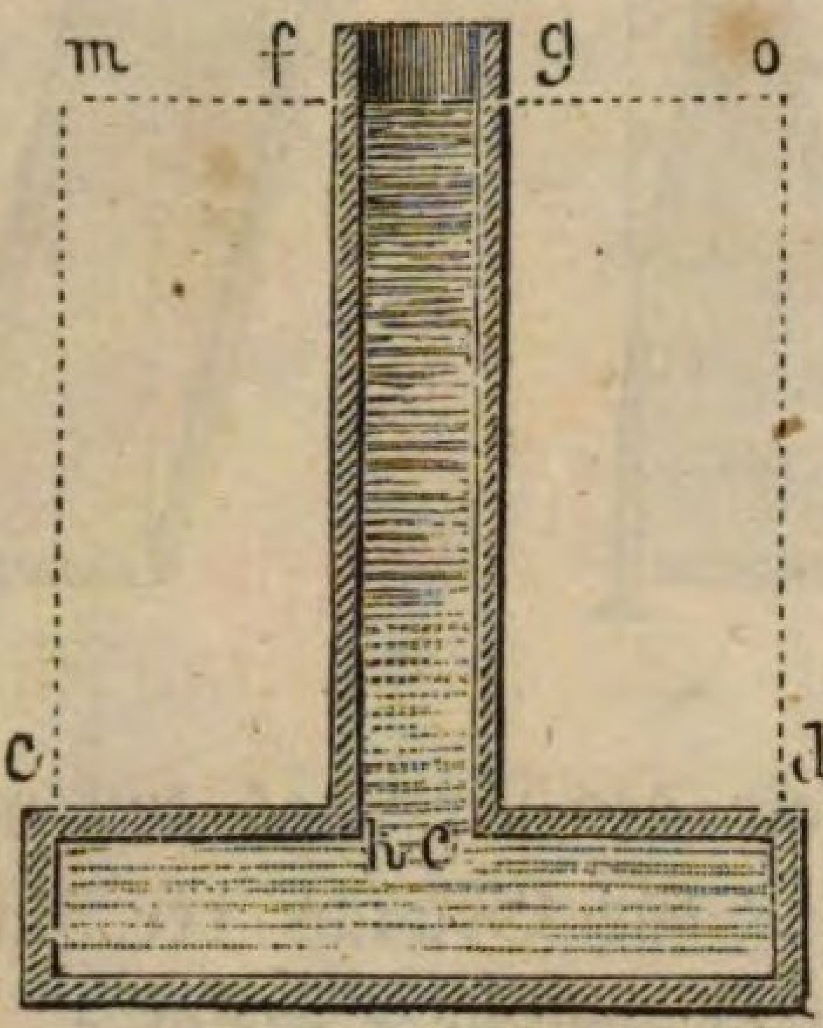
Absätze nur kleiner sind als die des zuerst betrachteten Gefäßes. Der Boden ab hat nur das Gewicht der Wassersäule $abcd$ zu tragen.

Die Größe der Absätze hat auf die Richtigkeit dieser Betrachtung keinen Einfluß; unsere Schlüsse gelten also auch noch, wenn die einzelnen treppenför-

migen Absätze verschwindend klein werden, sie also gelten auch noch für ein jedes oben erweitertes Gefäß.

Fig. 73 stelle ein unten weites Gefäß dar, an welchem sich oben eine engere Röhre ansetzt. Das Gefäß sey bis *fg* mit Wasser gefüllt. Der Boden *ab* hat zunächst das Gewicht der Wassersäule *abcd* zu tragen. Diese ist aber selbst durch die Wassersäule *hg* gedrückt, deren Gewicht auf die Wasserschicht *he* preßt. Der auf *he* lastende Druck pflanzt sich nun durch das Wasser in *abcd* in der Art gleichförmig fort, daß jeder Theil des Bodens *ab*, welcher eben so groß ist wie *he*, einen dem Gewicht der Wassersäule *fghe* gleichen Druck auszuhalten hat. Jedes Flächenstück des Bodens, welches gleich ist *he*, hat demnach einen Gesammtdruck auszuhalten, welcher gleich ist dem Gewicht einer vertikalen Wassersäule, deren Basis gleich *he*, deren Höhe aber gleich $ac + hf$ ist; daraus folgt nun ferner, daß der Gesammtdruck, welchen der Boden *ab* auszuhalten hat, gleich ist dem Gewicht einer geraden Wassersäule, deren Basis *ab* und deren Höhe *am* ist.

Fig. 73.



Darauf gründet sich die Real'sche Presse.

Wenden wir diese Schlüsse auf das Gefäß Fig. 74 an, welches bis oben hin mit Wasser gefüllt seyn soll, so ergiebt sich, daß der Druck auf den Boden *ab* gleich ist dem Gewicht einer vertikalen Säule, deren Basis *ab* und deren Höhe *ac* ist.

Fig. 74.

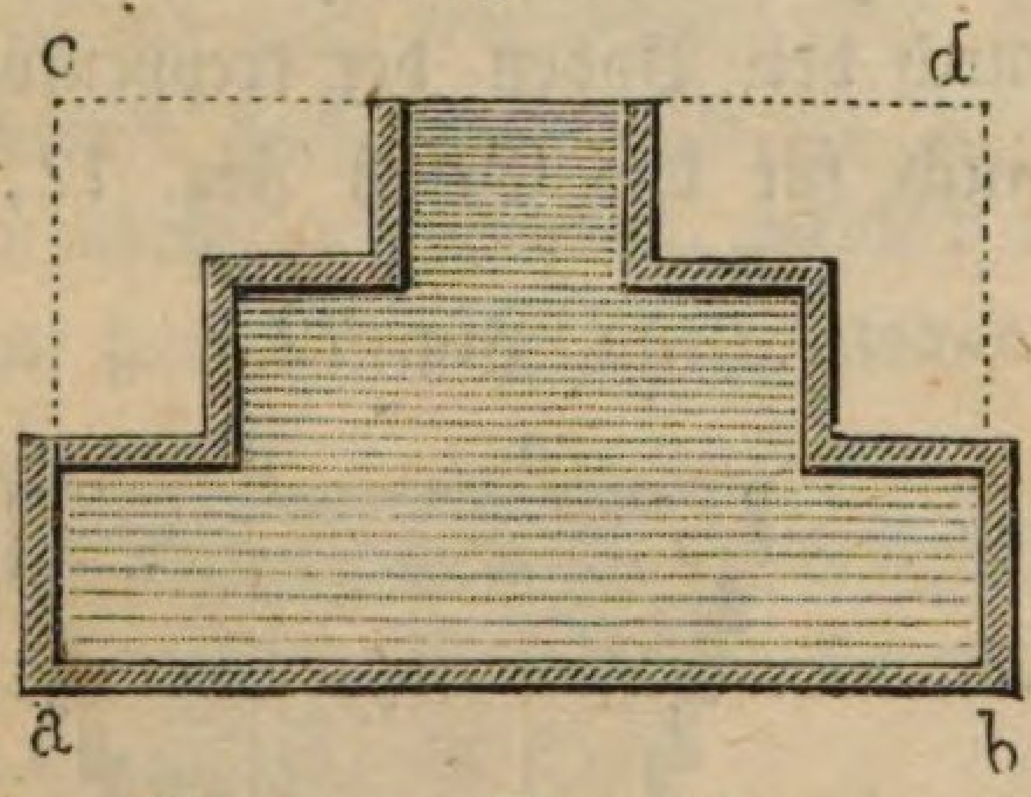


Fig. 75.

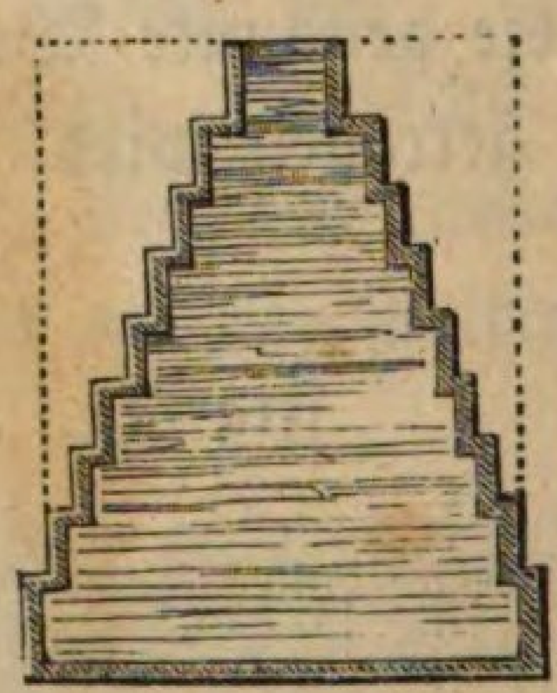


Fig. 76.

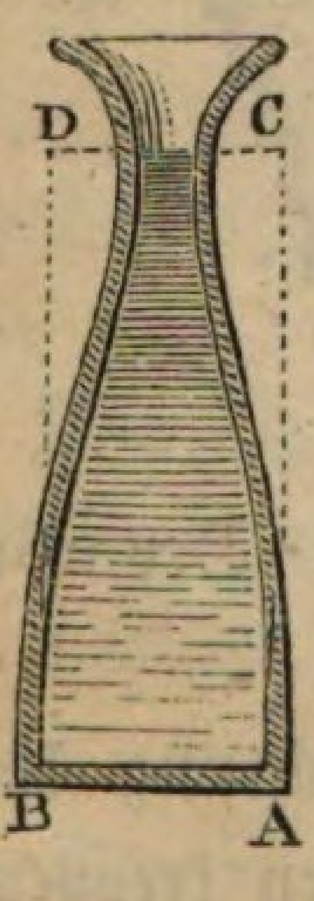
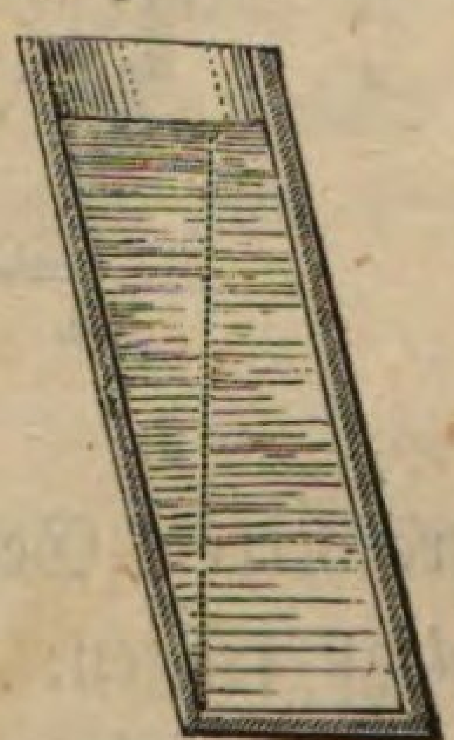


Fig. 77.



Aus denselben Gründen sind auch die Boden des Gefäßes Fig. 75 und des Gefäßes Fig. 76 gerade so stark gedrückt, als ob sie eine gerade Wassersäule von gleicher Basis und gleicher Höhe zu tragen hätten, da ja diese Schlüsse ebenso für kleinere und endlich auch für verschwindend kleine Absätze des Gefäßes gültig sind.

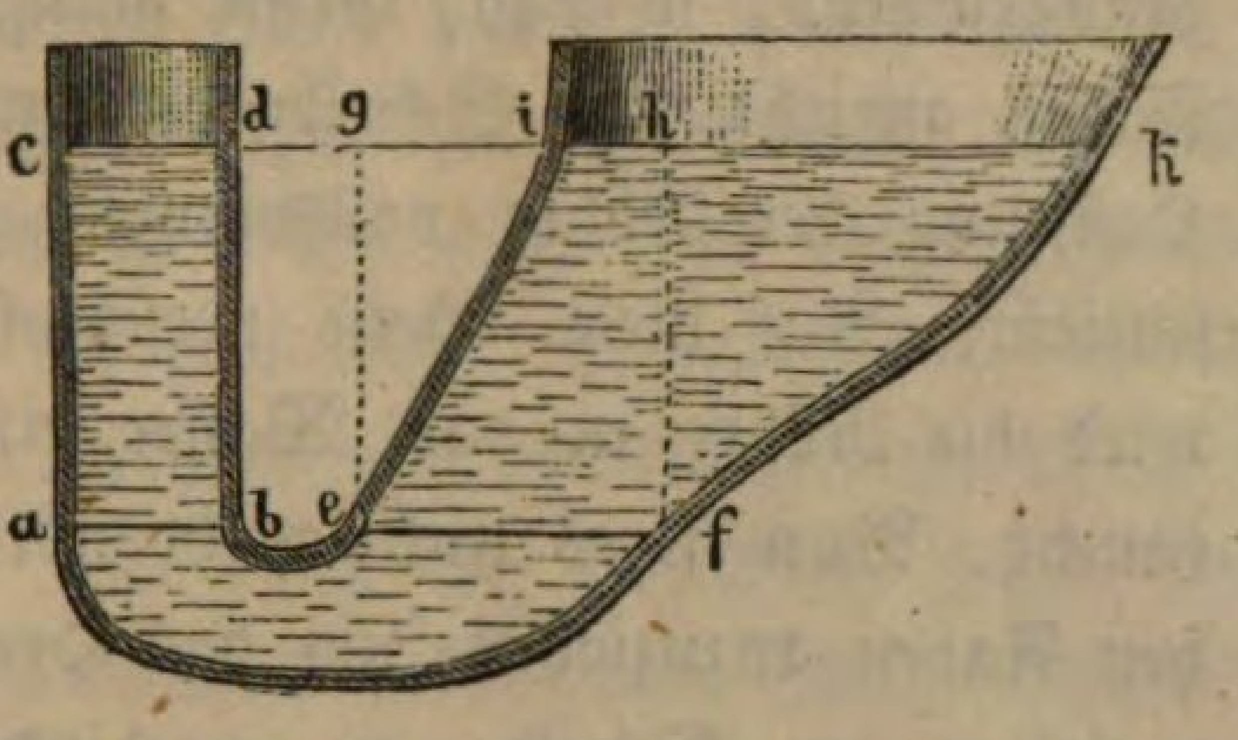
Aus dem Gesagten ergiebt sich auch

nun leicht die Richtigkeit unseres Satzes für den in Fig. 77 dargestellten Fall, daß das Gefäß schräg ist.

Kurz, der Druck, den der Boden eines mit Wasser gefüllten Gefäßes auszuhalten hat, ist von der Form dieses Gefäßes ganz unabhängig, er hängt bloß von der Größe des Bodens und seiner Tiefe unter dem Wasserspiegel ab.

Aus dem Gesagten folgt nun ferner, daß der Satz, welcher in Paragraph 31 nur für gerade cylindrische Gefäße bewiesen wurde, ganz allgemein wahr ist, daß in communicirenden Gefäßen für den Fall des Gleichgewichts der Spiegel der Flüssigkeit in gleicher Höhe seyn muß, welches auch übrigens die Gestalt der Gefäße seyn mag. Dem Druck der Wassersäule *abcd*, Fig. 78, wird das Gleichgewicht gehalten, wenn auf *ef* ein Druck wirkt, welcher dem Gewicht der verticalen Wassersäule *efgh* gleich ist. Nun aber übt ja, wie wir eben gesehen haben, die unregelmäßig geformte schräge Wassersäule *efik* auf ihre Grundfläche *ef* genau denselben Druck aus, wie die gleich hohe gerade Säule *efgh*, folglich muß in der That in beiden Schenkeln unseres Gefäßes das Wasser gleich hoch stehen, wenn Gleichgewicht stattfinden soll.

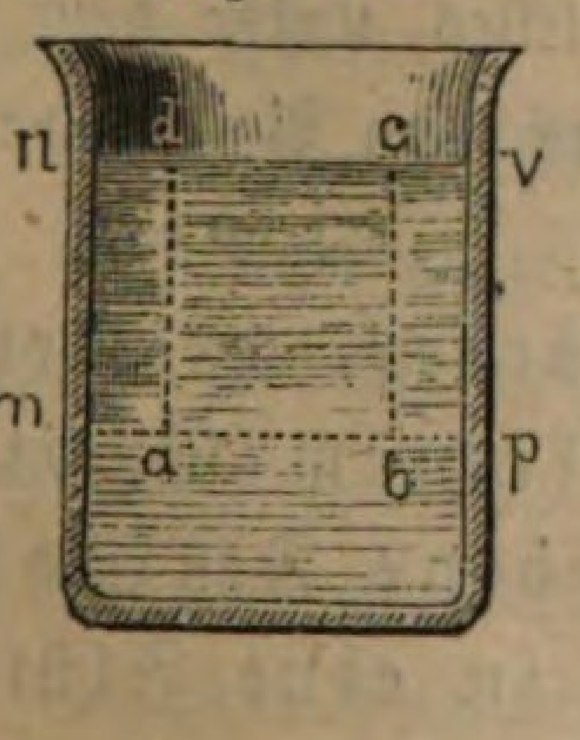
Fig. 78.



Seitendruck. Der Druck, welchen ein Stück der Seitenwand eines Gefäßes aushält, ist dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule gleich, welche so hoch ist, als der Schwerpunkt dieses Wandstücks unter dem Niveau liegt, und deren horizontale Basis gleich ist der Größe des Wandstücks selbst. 34

Der Seitendruck läßt sich aus dem entsprechenden horizontalen Drucke nach dem Princip der gleichmäßigen Fortpflanzung des Drucks nach allen Seiten ableiten. Der Punkt *m*, Fig. 7 ist ein Punkt der horizontalen Schicht *mp*; der Druck, dem dieselbe ausgesetzt ist, pflanzt sich gleichmäßig nach allen Richtungen, also auch rechtwinklig gegen die Wand fort. Jeder Punkt der Seitenwand erleidet demnach denselben Druck, dem jeder Punkt der gleich hohen horizontalen Flüssigkeitsschicht ausgesetzt ist. Betrachten wir nun irgend einen Flächentheil der Seitenwand, dessen höchster Punkt so wenig über seinem tiefsten liegt, daß der Druck, den diese beiden Punkte erleiden, ohne merklichen Fehler als gleich angenommen werden kann, so ist der Druck, welchen dieses Flächenstück aushält, offenbar $s \times h \times d$, wenn *s*, *h* und *d* die oben angeführte Bedeutung haben. In einem 10 Meter (31,8′) hohen Bottich voll Wasser ist der Druck auf ein Quadratcentimeter der Seitenwand in einer Tiefe von 1 Meter (3,18′) gleich 100 Grammen (1/5 Pfd.), in einer Tiefe von 2 Metern 200 Grammen, in einer Tiefe von 10 Metern aber, d. h. am Boden, gleich einem Kilogramm (2 Pfd.).

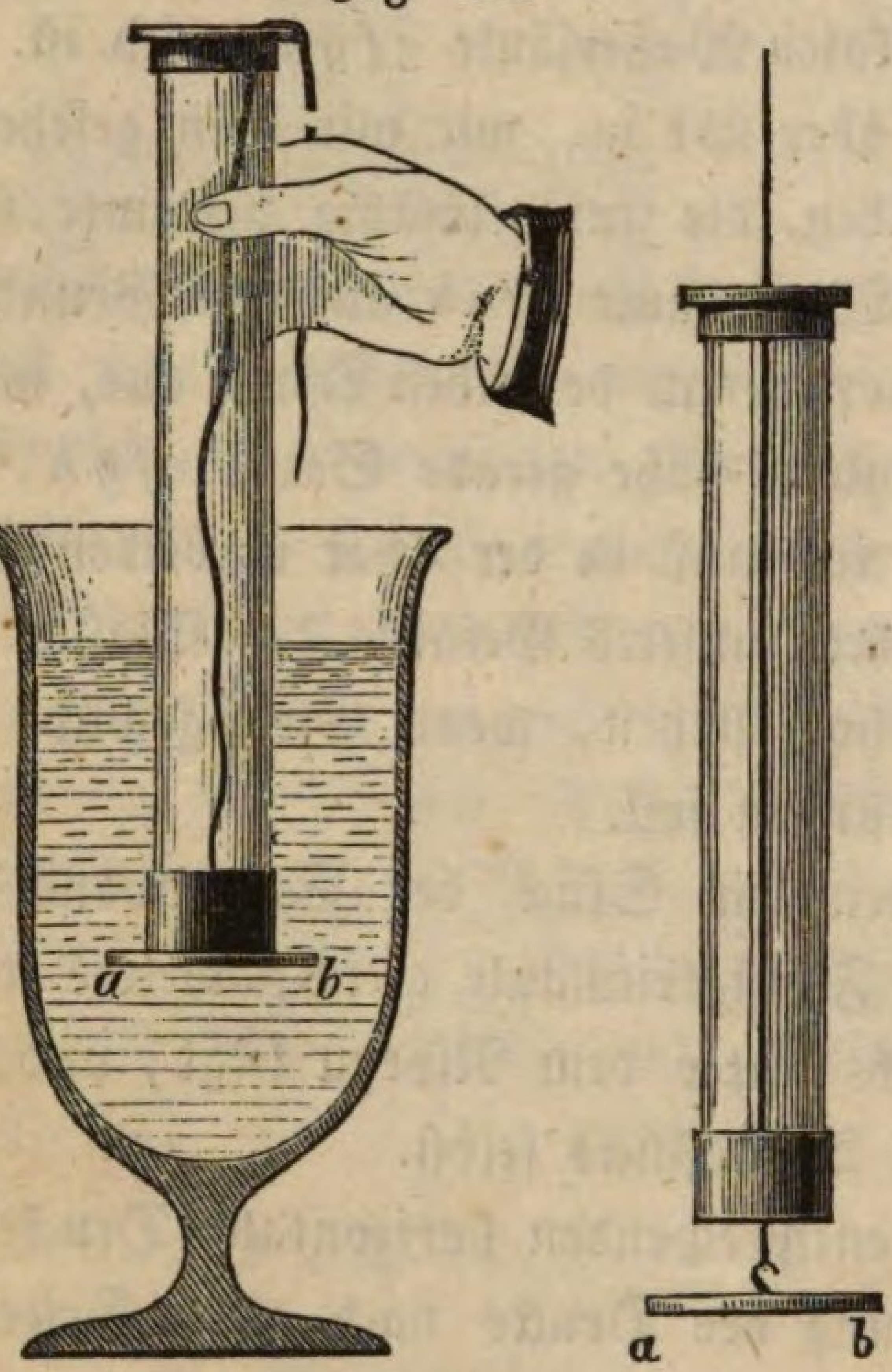
Fig. 79.



35 **Druck im Innern der Flüssigkeiten, Auftrieb.** Jede Schicht im Innern einer Flüssigkeit wird von beiden Seiten mit gleicher Kraft gedrückt; die Schicht *ab*, Fig. 79, hat von oben das Gewicht der Wassersäule *abcd* zu tragen. Dieser Druck ist aber durch einen ganz gleichen, von den benachbarten Wassersäulen herrührenden von unten her gegen *ab* wirkenden äquilibrirt. Daß im Innern der Flüssigkeit ein solcher nach oben wirkender Druck wirklich vorhanden ist, läßt sich leicht durch den Versuch zeigen.

Das untere Ende einer etwas weiten Glasröhre ist mit einer Messingfassung versehen, wie dies Fig. 80 zeigt. Der Rand derselben ist genau oben abgeschliffen. *a b* ist eine Metallscheibe, welche in ihrer Mitte einen Haken hat, so daß man sie an eine Schnur anhängen kann, welche durch die Röhre hindurchgeht, so daß, wenn man den Faden anzieht, die Scheibe die untere Oeffnung der Röhre vollkommen verschließt. Auf diese Weise verschlossen, wird die Röhre in das Wasser eingetaucht. Nun ist es nicht mehr nöthig, den Faden anzuziehen, um das Herunterfallen der Scheibe zu verhindern, weil sie durch die Flüssigkeit nach oben gedrückt wird. Gießt man Wasser in die Röhre, so wird die Glasscheibe durch ihr eigenes Gewicht fallen, sobald das Niveau des Wassers in der Röhre dem äußeren fast gleich ist, denn nun erleidet die Glasscheibe durch die Flüssigkeit gleichen Druck nach unten und nach oben.

Fig. 80.



36 **Das archimedische Princip.** Man sieht oft, daß schwere Körper sich in einem der Richtung der Schwere entgegengesetzten Sinne bewegen; Kork und Holz z. B. steigen in die Höhe, wenn sie in Wasser getaucht werden; ebenso steigt Eisen in Quecksilber und der Luftballon in der Luft in die Höhe. Alle diese Erscheinungen gründen sich auf ein Princip, welches unter dem Namen des archimedischen Princips bekannt ist, weil es von Archimedes entdeckt wurde.

Dies Princip kann so ausgedrückt werden: Ein Körper, welcher in eine Flüssigkeit eingetaucht ist, verliert von seinem Gewichte gerade so viel, als die aus der Stelle vertriebene Flüssigkeit wiegt. Oder richtiger gesagt: Wenn ein Körper in eine Flüssigkeit eingetaucht ist, so wird ein Theil seines Gewichtes von der Flüssigkeit getragen, welcher dem Gewichte der aus der Stelle getriebenen Flüssigkeit gleich ist.

Fig. 81.



Man kann sich von der Richtigkeit dieses Princips durch eine einfache Betrachtung überzeugen. Irgend ein gerades Prisma sey vertikal in die Flüssigkeit eingetaucht, wie es beistehende Figur 81 zeigt, so ist jeder Druck auf die Seiten des Prismas durch einen gleichen und entgegengesetzten aufgehoben, die obere Fläche aber erleidet den Druck einer Flüssigkeitssäule, welche mit dem Prisma gleiche Grundfläche und die Höhe *h* hat. Die untere Fläche dagegen wird von unten nach oben mit einer Kraft gedrückt, welche dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule von derselben Basis und der Höhe *h'* gleich ist. Die Höhen *h* und *h'* differiren aber gerade um die Höhe des Prismas, und somit ist klar, daß der Druck auf die untere Fläche den auf die obere um das Gewicht einer Flüssigkeitssäule übertrifft, welche dem Volumen des Prismas gleich ist. Da aber nun dieser Ueberschuß des Drucks nach oben der Schwere des Körpers selbst entgegenwirkt, so wird offenbar die Wirkung der Schwerkraft des Körpers auf die angegebene Weise vermindert.

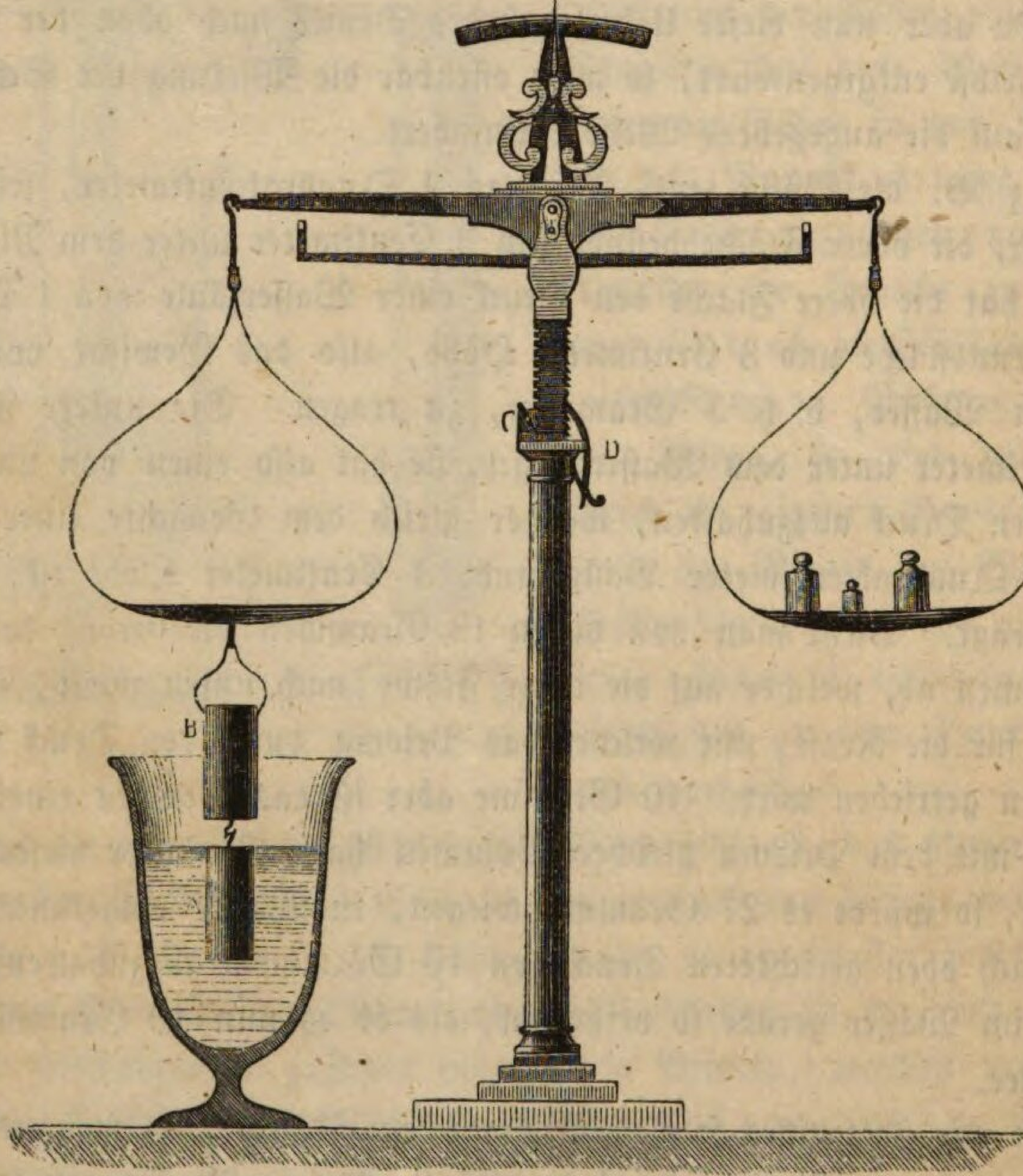
Es sey z. B. die Basis jenes Prismas 1 Quadratcentimeter, seine Höhe 10 Centimeter, die obere Fläche befinde sich 3 Centimeter unter dem Niveau des Wassers, so hat die obere Fläche den Druck einer Wassersäule von 1 Quadratcentimeter Grundfläche und 3 Centimeter Höhe, also das Gewicht von 3 Kubikcentimetern Wasser, d. h. 3 Grammen, zu tragen. Die untere Fläche ist aber 13 Centimeter unter dem Wasserspiegel, sie hat also einen von unten nach oben wirkenden Druck auszuhalten, welcher gleich dem Gewichte einer Wassersäule von 1 Quadratcentimeter Basis und 13 Centimeter Höhe ist, also 13 Gramme beträgt. Zieht man von diesen 13 Grammen die Größe des Drucks von 3 Grammen ab, welcher auf die obere Fläche nach unten wirkt, so bleiben 10 Gramme für die Kraft, mit welcher das Prisma durch den Druck des Wassers nach oben getrieben wird. 10 Gramme aber ist das Gewicht einer Wassersäule, welche mit dem Prisma gleiches Volumen hat. Bestände dieses Prisma aus Marmor, so würde es 27 Gramme wiegen, in Wasser eingetaucht hat es aber einen nach oben gerichteten Druck von 10 Grammen auszuhalten, folglich wird es sich im Wasser gerade so verhalten, als ob es nun 10 Gramme leichter geworden wäre.

Nehmen wir statt eines solchen Prismas ein Bündel von mehreren, so ist klar, daß jedes einzelne Prisma durch das Eintauchen in Wasser von seinem Gewichte so viel verliert, als ein gleiches Volumen Wasser wiegt, folglich ist auch der Gewichtsverlust, welchen der ganze, aus mehreren Prismen zusammengesetzte Körper erleidet, gleich dem Gewichte einer Wassermasse, deren Volumen dem Gesammtvolumen aller Prismen gleich ist. Da man sich aber einen jeden Körper in eine Menge solcher vertikal stehender Prismen von sehr kleinem Durchmesser zerlegt denken kann, so läßt sich unser Schluß auf jeden beliebigen Körper ausdehnen.

Eine ganz andere Schlußweise führt uns zu demselben Resultate. Denken wir uns, der Raum, den der in Wasser eingetauchte Körper einnimmt, sey selbst mit Wasser angefüllt, so wird dieser Wasserkörper in der übrigen Wassermasse schweben, er wird nicht steigen und nicht sinken. Denken wir uns nun den Wasserkörper durch einen anderen ersetzt, der bei gleichem Volumen gleiches Gewicht mit dem Wasserkörper hat, so wird auch dieser schweben, sein ganzes Gewicht wird also durch das Wasser, in welches er eingetaucht ist, getragen, und somit ist klar, daß allgemein von dem Gewichte eines jeden in Wasser eingetauchten Körpers ein Theil durch das Wasser getragen wird, welcher dem Gewichte des verdrängten Wassers gleich ist.

Von der Wahrheit des archimedischen Princips kann man sich auch direct durch den Versuch überzeugen. An der einen Wagschale einer gewöhnlichen Wage ist ein hohler Cylinder *B*, Fig. 82, angehängt, an welchem wieder

Fig. 82.



ein massiver Cylinder *A* hängt, welcher genau die Höhlung des oberen ausfüllt. Auf die andere Wagschale legt man nun so viel Gewichte, daß das Gleichgewicht hergestellt ist. Taucht man aber nun den Cylinder *A* in Wasser, so verliert er dadurch einen Theil seines Gewichts, das Gleichgewicht ist also gestört; um es von Neuem wieder herzustellen, braucht man nur den Cylinder *B* voll Wasser zu gießen, was offenbar zeigt, daß *A* durch das Eintauchen in Wasser gerade so viel an Gewicht verloren hat, als das Wasser wiegt, welches den

Cylinder *B* ausfüllt. Das Volumen des in *B* befindlichen Wassers ist aber dem Volumen des Wassers gleich, welches der Cylinder *A* aus der Stelle treibt, mithin ist der Gewichtsverlust gleich dem Gewichte des aus der Stelle vertriebenen Wassers.

Wie wir vorher gesehen haben, würde alles im Gleichgewicht seyn, wenn man einen in's Wasser eingetauchten Körper selbst in Wasser verwandeln könnte. Dieser Wasserkörper aber würde auch vollkommen im Gleichgewicht bleiben, wie man ihn auch um seinen Schwerpunkt drehen mag. Der von unten nach oben wirkende Druck der umgebenden Flüssigkeit ist demnach eine Kraft, deren Angriffspunkt mit dem Schwerpunkte des gedachten Wasserkörpers zusammenfällt. Dieser Punkt mag **Mittelpunkt des Druckes** (der Flüssigkeit) heißen.

Wenn nun statt des gedachten Wasserkörpers irgend ein anderer Stoff, z. B. Kork, Marmor, Eisen u. s. w., wieder seinen Raum einnimmt, so wird der Druck, den dieser Körper von der umgebenden Wassermasse auszuhalten hat, genau derselbe seyn, welchen der gedachte Wasserkörper hätte aushalten müssen. Ein in Wasser eingetauchter Körper ist demnach der Wirkung zweier Kräfte unterworfen, deren Größe und Angriffspunkt wir jetzt kennen. Die erste Kraft ist die Schwere des Körpers, welche von oben nach unten wirkt, und deren Angriffspunkt der Schwerpunkt des Körpers ist; die zweite Kraft, welche von unten nach oben wirkt, ist gleich dem Gewichte des aus der Stelle vertriebenen Wassers, und ihr Angriffspunkt der Schwerpunkt dieser Wassermasse. Wenn ein vollständig untergetauchter Körper vollkommen homogen ist, so fällt sein Schwerpunkt mit dem Schwerpunkte der vertriebenen Wassermasse zusammen.

Der nach oben wirkende Druck der Flüssigkeit wird mit dem Namen **Auftrieb** bezeichnet.

Das **archimedische** Princip giebt uns treffliche Mittel, das specifische 37
Gewicht fester und flüssiger Körper zu bestimmen. Um die Dichtigkeit eines festen Körpers zu berechnen, muß man sein absolutes Gewicht und das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser kennen. In den meisten Fällen aber läßt sich das Volumen eines Körpers durch Ausmessung seiner Dimensionen entweder nur höchst schwierig oder gar nicht ausmitteln. Nach dem **archimedischen** Princip giebt uns ein einziger Versuch ohne Weiteres das Gewicht einer Wassermasse, welche mit dem zu bestimmenden Körper gleiches Volumen hat, wir haben nur seinen Gewichtsverlust beim Eintauchen in Wasser zu bestimmen.

Um diese Bestimmung mittelst einer Wage leicht ausführen zu können, wird an derselben eine kleine Veränderung angebracht, wodurch sie in eine sogenannte **hydrostatische** Wage umgewandelt wird. Man ersetzt nämlich die eine Wagschale durch eine andere, an der sich unten ein Häkchen befindet, an welches der zu bestimmende Körper gehängt werden kann, Fig. 82 a. f. S. Ist dies geschehen, so kann man durch Auflegen von Gewichten auf die andere Wagschale das absolute Gewicht *g* des Körpers bestimmen. Taucht man ihn nun in Wasser ein, so muß man von dem aufgelegten Gewichte *g* einen Theil *a* wegnehmen, um das Gleichgewicht der Wage wieder herzustellen, *a* ist also der Gewichtsverlust,

welchen der Körper beim Eintauchen in Wasser erleidet, folglich $\frac{g}{a}$ sein spec. Gewicht.

Fig. 83.

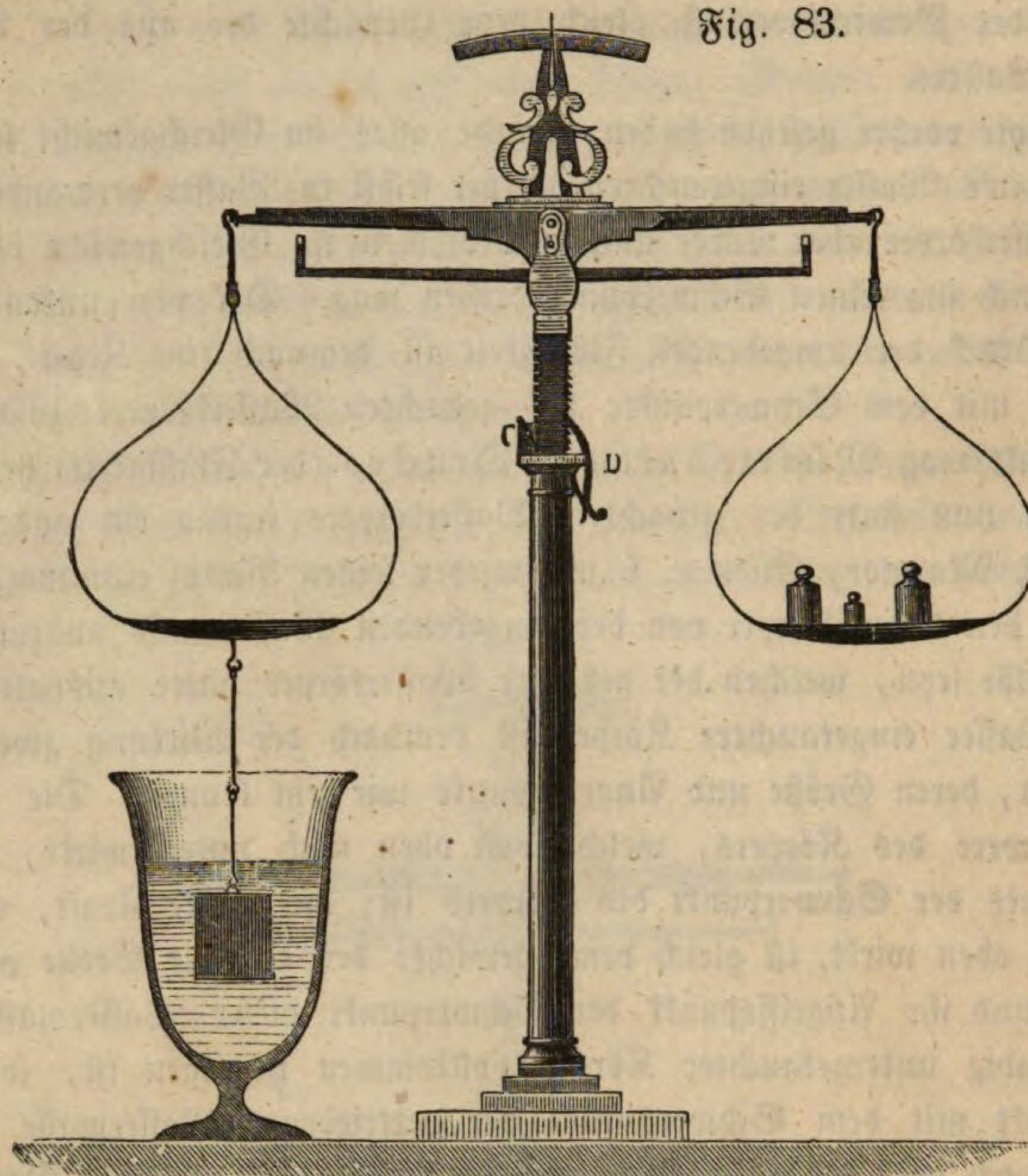
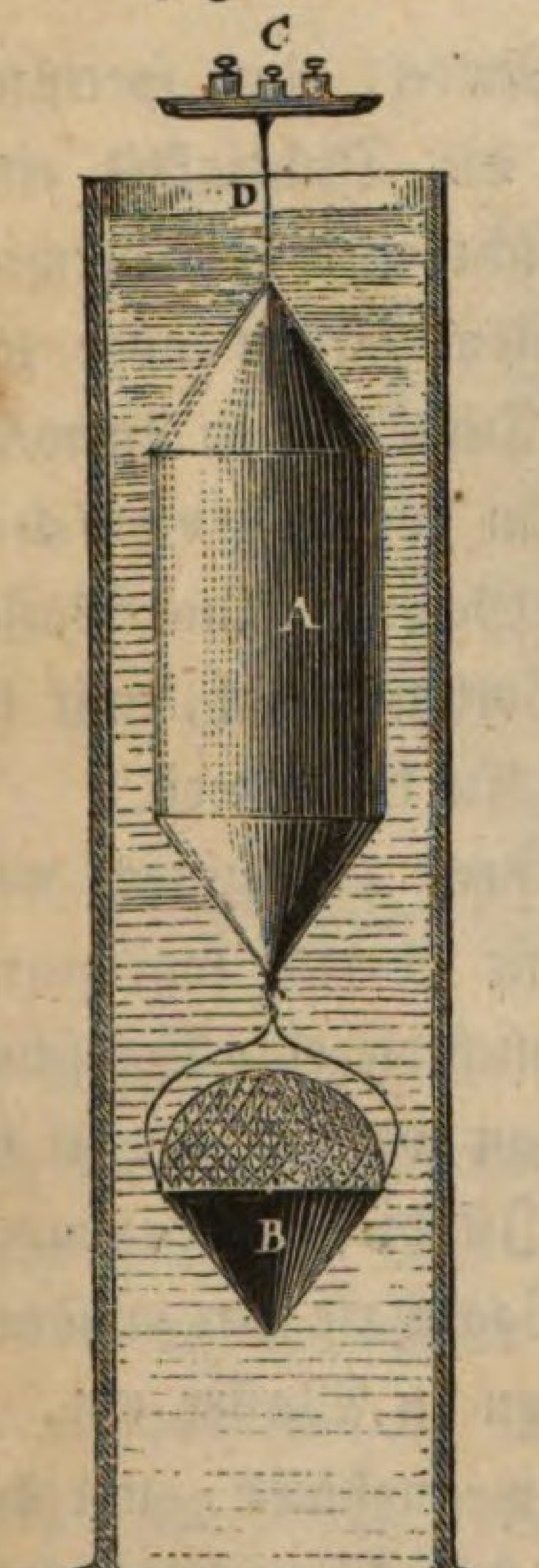


Fig. 84.



38 **Nicholson's Aräometer.** Zur Bestimmung des spec. Gewichts fester Körper kann statt der Wage das Nicholson'sche Aräometer angewandt werden, welches in Fig. 84 abgebildet ist.

An einem hohlen Körper von Messingblech ist unten ein Hohlkegel *B* angehängt, oben aber ein feines Stäbchen angebracht, welches einen Teller trägt, auf den man kleinere Körper und Gewichte legen kann. In Wasser eingetaucht, schwimmt das Instrument aufrecht, weil dafür gesorgt ist, daß sein Schwerpunkt möglichst tief liegt. Das Instrument ist so eingerichtet, daß der oberste Theil des Körpers *A* noch aus dem Wasser herausragt. Legt man nun den Körper, dessen specifisches Geiwcht man bestimmen will, etwa ein Mineral, auf den Teller, so sinkt das Instrument weiter ein, und durch ferneres Auflegen von Tarirgewichten kann man es leicht dahin bringen, daß es genau bis zu

einem Punkte *D* eingesenkt ist, welchen man auf irgend eine Weise (gewöhnlich durch einen Feilstrich) auf dem Stäbchen markirt hat. Man nimmt nun das Mineral weg und legt statt dessen so viel Gewicht auf, bis das Instrument wieder genau bis *D* einsinkt. Auf diese Weise erhält man das absolute Gewicht des Körpers. Es betrage *n* Milligramme.

Hat man auf diese Weise das absolute Gewicht des Minerals bestimmt, so werden die *n* Milligramme wieder weggenommen und der Körper in das Sieb gelegt. Das Instrument würde nun wieder bis *D* einsinken, wenn der in die Schüssel *B* gelegte Körper nicht dadurch, daß er jetzt in Wasser eingetaucht ist, an Gewicht verlöre. Man wird also auf den Teller noch Gewichte, *m* Milligramme, auflegen müssen, damit das Instrument wieder bis zur Marke eingetaucht wird. Man hat auf diese Weise das absolute Gewicht des Körpers *n* und das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser *m* ermittelt; das gesuchte specifische Gewicht ist also $\frac{n}{m}$.

Es sey z. B. das specifische Gewicht eines Diamanten zu bestimmen. Man hat ihn auf den Teller gelegt, und so viel Tarirgewicht zugefügt, daß das Instrument bis *D* einsinkt. Nachdem der Diamant weggenommen worden, hatte man statt seiner 1,2 Gramme aufzulegen, damit das Aräometer eben so weit einsank; es beträgt also sein absolutes Gewicht 1,2 Gramme. Diese werden wieder weggenommen und der Diamant in's Körbchen gelegt; um es nun wieder dahin zu bringen, daß das Instrument bis *D* einsinkt, muß man noch 0,34 Gramme auf den Teller legen; das Gewicht eines dem Diamanten gleichen Wasservolumens ist also 0,34 Gramm, und das verlangte specifische Gewicht $\frac{1,2}{0,34} = 3,53$.

Auch das specifische Gewicht von Flüssigkeiten kann man mit dem Nicholson'schen Aräometer bestimmen. Da das Instrument stets so weit einsinkt, daß das Gewicht desselben sammt den Gewichten auf dem Teller der verdrängten Flüssigkeitsmasse gleich ist, so kann man mit Hülfe dieses Instrumentes ausmitteln, wie viel ein bestimmtes Volumen der Flüssigkeit wiegt. Dazu ist aber nöthig, daß man das Gewicht des Instruments selbst kennt; dies Gewicht sey *g*. Wenn das Instrument in Wasser eingetaucht, bis *D* einsinken soll, so muß noch Gewicht zugelegt werden. Bezeichnen wir dies Zulagegewicht mit *a*, so ist $g + a$ das Gewicht der verdrängten Wassermenge.

Taucht man nun das Instrument in eine andere Flüssigkeit, so wird man irgend ein anderes Gewicht *b* anstatt *a* auflegen müssen, um ein Einsinken bis *D* zu bewerkstelligen; *b* wird größer seyn als *a*, wenn die Flüssigkeit schwerer, kleiner als *a*, wenn sie leichter ist, als Wasser. Das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit ist $g + b$; das Volumen derselben ist aber genau so groß, als das Gewicht der Wassermenge, deren Gewicht $g + a$ ist, weil ja das Aräometer in beiden Fällen gleich tief eingesunken ist.

Das Instrument wiege z. B. 70 Gramme, man muß 20 Gramme auf-

legen, damit es in Wasser und 1,37 Gramme, damit es in Weingeist bis *D* einsinkt; es ist also das specifische Gewicht des Weingeistes $\frac{70 + 1{,}37}{70 + 20} = 0{,}793$.

Dieses Aräometer ist um so empfindlicher, je dünner das Stäbchen im Vergleich zum eingetauchten Volumen ist.

Mit diesem Aräometer das specifische Gewicht von Flüssigkeiten zu bestimmen, ist immer etwas umständlich. Man könnte eben so schnell mit Hülfe der Wage nach dem in Nr. 37 angegebenen Verfahren mit weit größerer Genauigkeit zum Ziele kommen. In vielen Fällen des praktischen Lebens aber kommt es darauf an, schnell durch ein möglichst einfaches Verfahren das specifische Gewicht einer Flüssigkeit auszumitteln, um daraus auf die Qualität einer Flüssigkeit zu schließen. In solchen Fällen reicht es aber vollkommen hin, das specifische Gewicht bis auf zwei Decimalstellen genau zu finden; man erreicht dies am schnellsten durch die Scalenaräometer, die wir sogleich näher betrachten wollen.

39 **Scalenaräometer.** Durch das Nicholson'sche Aräometer wurde das specifische Gewicht einer Flüssigkeit aus der Vergleichung des absoluten Gewichts gleicher Volumina abgeleitet. Der Gebrauch der Scalenaräometer aber gründet sich darauf, daß bei gleichem absoluten Gewichte die specifischen Gewichte sich umgekehrt verhalten wie die Volumina.

Es stellt Fig. 85 ein Scalenaräometer dar. In der Regel bestehen sie aus einer cylindrischen Glasröhre, welche unten erweitert ist, wie man in der Abbildung sieht. In der unteren Kugel befindet sich etwas Quecksilber, wodurch nur bezweckt wird, daß das Instrument aufrecht schwimmt. Denken wir uns das Instrument im Wasser schwimmend, so ist das Gewicht des verdrängten Wassers dem Gewichte des Instruments gleich. Senken wir es nun in eine andere Flüssigkeit, so wird es tiefer oder weniger tief einsinken, je nachdem die Flüssigkeit leichter oder schwerer ist als Wasser. Gesetzt, das Aräometer wiege 10 Gramme, so wird es, in Wasser schwimmend, 10 Kubikcentimeter verdrängen. Taucht man es in Weingeist, so wird es so tief einsinken, daß die verdrängte Weingeistmenge auch 10 Gramme wiegt. Aber 10 Gramme Weingeist nehmen einen größeren Raum ein als 10 Gramme Wasser, das Instrument muß also tiefer einsinken, und zwar so, daß das in Weingeist eingesenkte Volumen sich zu dem in Wasser eingesenkten umgekehrt verhält, wie die specifischen Gewichte dieser Flüssigkeiten.

Fig. 85.



Man begreift nun wohl, daß, wenn die Röhre zweckmäßig getheilt ist, man aus einer einzigen leicht anzustellenden Beobachtung das specifische Gewicht einer Flüssigkeit ermitteln kann. Unter allen Scalen, welche man auf Aräometern angebracht hat, ist

unstreitig die von Gay-Lussac angegebene die einfachste und zweckmäßigste; wir wollen deshalb diese zuerst betrachten.

Denken wir uns an einem Aräometer denjenigen Punkt *a* der Röhre bezeichnet, bis zu welchem das Instrument in Wasser einsinkt, alsdann auf der Röhre, von diesem Punkt ausgehend, eine Reihe von Theilstrichen nach oben und unten so angebracht, daß das Volumen eines Röhrenstücks, welches zwischen je zwei solcher Theilstriche fällt, $\frac{1}{100}$ von dem in Wasser einsinkenden Volumen ist. Nehmen wir z. B. an, das Volumen desjenigen Theils des Aräometers, welches im Wasser untergetaucht ist, betrüge gerade 10 Kubikcentimeter, so müßte das Volumen des Röhrenstücks, welches zwischen je zwei Theilstriche fällt, 0,1 Kubikcentimeter betragen.

Der Wasserpunkt *a* wird mit 100 bezeichnet und die Theilung von unten nach oben gezählt. Die auf diese Weise getheilten Aräometer werden mit dem besondern Namen **Volumeter** bezeichnet.

Gesetzt, das Aräometer sänke in irgend einer Flüssigkeit bis zum Theilstrich 80 der Volumeterscala ein, so weiß man dadurch, daß 80 Volumtheile dieser Flüssigkeit so viel wiegen, wie 100 Volumtheile Wasser; das specifische Gewicht dieser Flüssigkeit verhält sich also zu dem des Wassers, wie 100 zu 80, es ist also $\frac{100}{80}$ oder 1,25.

Wäre das Volumeter in einer anderen Flüssigkeit bis zum Theilstrich 116 der Volumeterscala eingesunken, so finden wir durch dieselbe Schlußweise, daß das specifische Gewicht dieser Flüssigkeit $\frac{100}{116} = 0{,}862$ ist. Kurz, **wenn das Volumeter in einer Flüssigkeit bis zu einem bestimmten Punkte y der Scala einsinkt, so findet man das specifische Gewicht s der Flüssigkeit, wenn man die Zahl des beobachteten Scalenpunkts in 100 dividirt, d. h. es ist** $s = \frac{100}{y}$.

Die Genauigkeit eines solchen Instruments ist um so größer, je größer die Entfernung eines Theilstriches vom anderen, je dünner also die Röhre im Vergleich zu dem Volumen des ganzen Instruments ist. Damit jedoch die Röhre nicht gar zu lang wird, macht man kein Volumeter, welches für alle Flüssigkeiten anwendbar ist, sondern solche, welche entweder nur für leichtere oder nur für schwerere Flüssigkeiten gebraucht werden können. Bei den ersteren befindet sich der mit 100 bezeichnete Wasserpunkt nahe am unteren, bei den letzteren aber nahe am oberen Ende der Röhre.

Im praktischen Leben ist es nicht direct der Zweck, das specifische Gewicht einer Flüssigkeit zu erfahren, sondern man will den Concentrationsgrad einer Salzlösung, die Mischungsverhältnisse einer Flüssigkeit kennen lernen. Diese stehen nun freilich mit dem specifischen Gewichte in genauer Beziehung, so daß, wenn man mit Hülfe des Aräometers das specifische Gewicht einer Flüssigkeit ausgemittelt hat, man daraus auch auf die Natur der Flüssigkeit schließen

kann. Man hat jedoch für solche Flüssigkeiten, welche in der Praxis häufig vorkommen, besondere Aräometer construirt, welche unmittelbar die Mischungsverhältnisse angeben; wir wollen hier nur eines der wichtigsten, nämlich das Alkoholometer näher betrachten.

Das Alkoholometer dient zur Bestimmung des Alkoholgehalts einer Mischung von Wasser und Weingeist.

Das specifische Gewicht des Alkohols ist 0,793, wenn man das des Wassers als Einheit annimmt; eine Mischung von Wasser und absolutem Alkohol wird also eine Dichtigkeit haben, welche zwischen 1 und 0,793 fällt und sich mehr der einen oder der anderen Gränze nähert, je nachdem die Mischung mehr Wasser oder mehr Alkohol enthält. Die Dichtigkeit der Mischung weicht jedoch von dem arithmetischen Mittel ab, welches man aus den Mischungsverhältnissen berechnet.

Der Grund dieser Abweichung liegt darin, daß, wenn man Wasser und Weingeist mischt, eine Contraction stattfindet, die wir erst durch einen Versuch anschaulich machen wollen.

Fig. 86.



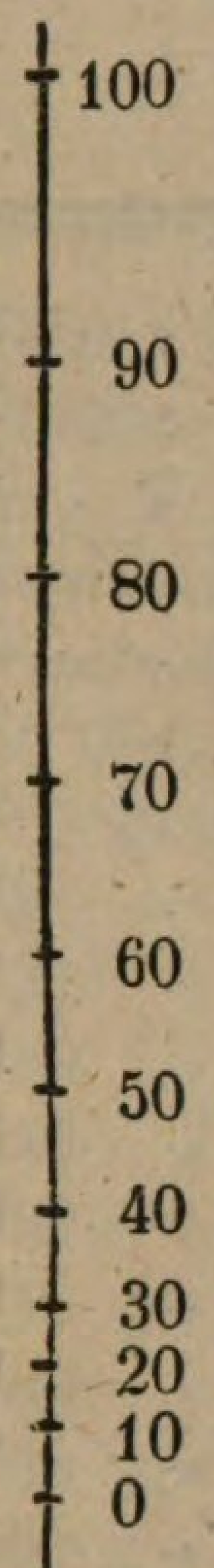
Man gieße eine Glasröhre (etwa eine solche, wie man sie zum Torricelli'schen Versuche nimmt) halb voll Wasser und fülle die andere Hälfte mit Weingeist (für Vorlesungen ist gefärbter Weingeist zu empfehlen), so werden sich die Flüssigkeiten nicht mischen; der Weingeist schwimmt auf dem Wasser. Nachdem das offene Ende durch einen Korkstöpsel fest verschlossen worden ist, so daß durchaus keine Flüssigkeit entweichen kann, kehrt man die Röhre um, so wird durch das Sinken des Wassers alsbald eine Mischung der Flüssigkeiten vor sich gehen. Hat die Mischung vollständig stattgefunden, so sieht man, daß die vorher ganz volle Röhre nicht mehr ganz angefüllt ist, es hat sich ein leerer Raum gebildet, der in einer 30 Zoll langen Röhre eine Länge von ungefähr ½ Zoll einnimmt.

Die Punkte, bis zu welchen ein Aräometer in Weingeist von verschiedenem Alkoholgehalt einsinken wird, lassen sich demnach nur durch Versuche ermitteln.

Markirt man auf der Scala eines Aräometers diejenigen Punkte, bis zu welchen das Instrument in Weingeist einsinken wird, welche 10, 20, 30, 40 ꝛc. Volumprocente Alkohol enthält, theilt man die Zwischenräume in 10 gleiche Theile, so erhält man ein Procent-Aräometer für Weingeist, d. h. ein Aräometer, an welchem man unmittelbar ablesen kann, wie viel Volumprocente Alkohol in einer Mischung von Wasser und Weingeist sich befinden. Solche Alkoholometer wurden in Frankreich nach Gay-Lussac's, in Deutschland nach Tralles' Angaben ausgeführt und gesetzlich bestimmt, daß der Alkoholgehalt des der Besteuerung unterworfenen Branntweins, Weingeistes u. s. w. mit Hülfe dieses Instrumentes ermittelt werden sollte. Beistehende Scala, (Fig. 87) zeigt die Hauptabtheilungen eines solchen Alkoholometers in

ihrem richtigen Verhältniß. Man sieht, wie sich erwarten ließ, daß die Abtheilungen ungleiche Größe haben.

Fig. 87.



Das Volumeter kann das Alkoholometer recht gut ersetzen, wenn man nur eine Tabelle zur Hand hat, in welcher der Alkoholgehalt angegeben ist, welcher den verschiedenen Volumetergraden entspricht.

Begreiflicher Weise kann man das Alkoholometer einzig und allein zu dem angegebenen Zwecke verwenden, für jede andere Flüssigkeit ist es völlig unbrauchbar. Auf ähnliche Weise, wie das Alkoholometer, hat man auch Aräometer construirt, welche den Gehalt einer Säure, einer Salzlösung u. s. w. angeben sollen. Weil jedoch ein solches Instrument nur für eine einzige specielle Flüssigkeit brauchbar ist, so wendet man besser ein für allemal das Volumeter an und sucht den Gehalt, welcher dem beobachteten Volumetergrade entspricht, in Tabellen, welche eigens zu diesem Zwecke berechnet worden sind.

Es bleiben jetzt nur noch die älteren Aräometerscalen zu erwähnen, welche jedoch durchaus keinen wissenschaftlichen Werth haben.

Beaumé bestimmte außer dem Wasserpunkte noch einen zweiten fixen Punkt dadurch, daß er das Instrument in eine Lösung von 1 Gewichtstheil Kochsalz in 9 Gewichtstheilen Wasser tauchte. Den Raum zwischen diesen beiden Punkten theilte er in 10 gleiche Theile, die er Grade nannte; die Theilung ist auch noch jenseits der beiden fixen Punkte fortgesetzt. Für Flüssigkeiten, welche schwerer sind, als Wasser, ist der Wasserpunkt mit 0 bezeichnet, und die Grade werden nach unten gezählt. Für leichtere Flüssigkeiten ist der Wasserpunkt mit 10 bezeichnet, und die Grade werden nach oben gezählt. Man sieht wohl, daß man durch ein solches Instrument weder das specifische Gewicht, noch den Gehalt einer Flüssigkeit erfährt.

Cartier brachte an der Beaumé'schen Scala eine unwesentliche Veränderung an, er machte nämlich die Grade etwas größer, so daß 15 seiner Grade gleich 16 Beaumé'schen sind. Wenn er dadurch auch nichts genützt hat, so hat er doch wenigstens seinen Namen verewigt, denn so werthlos auch seine Scala seyn mag, so ist sie doch ungemein verbreitet.

Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung von specifischen Gewichten einiger Körper, welche zu kennen häufig nothwendig oder wenigstens von Interesse ist.

Tabelle der specifischen Gewichte einiger festen Körper bei 0 Grad.

Platin	gemünzt	22,100
	gewalzt	22,069
	geschmolzen	20,857
Gold	gemünzt	19,325
	geschmolzen	19,253
Iridium		18,600
Wolfram		17,600
Blei, geschmolzen		11,352
Palladium		11,300
Silber		10,474
Wismuth		9,822
Kupfer	gehämmert	8,878
	gegossen	7,788
	zu Draht gezogen	8,780
Kadmium		8,694
Molybdän		8,611
Messing		8,395
Arsenik		8,308
Nickel		8,279
Uran		8,100
Stahl		7,816
Kobalt		7,812
Eisen	geschmiedet	7,788
	gegossen	7,207
Zinn		7,291
Antimon		6,712
Tellur		6,115
Chrom		5,900
Jod		4,948
Schwerspath		4,426
Selen		4,320
Diamant		3,520
Flintglas	von Fraunhofer	3,779
	französisches	3,200
	englisches	3,373
Bouteillenglas		2,600
Spiegelglas		2,370
Turmalin (grün)		3,155
Marmor		2,837
Smaragd		2,775
Bergkrystall		2,683
Porcellan	sächsisches	2,493
	französisches	2,145
	chinesisches	2,384
Gyps (krystallisirt)		2,311
Schwefel (natürlich)		2,033
Elfenbein		1,917
Alabaster		1,874
Anthracit		1,800
Phosphor		1,770
Bernstein		1,078
Ebenholz		1,226
Eichenholz (alt)		1,170
Buxbaum		1,330
Mahagonyholz		1,060
Wachs, weißes		0,969
Natrium		0,972
Kalium		0,865
Ahornholz	frisch	0,904
	trocken	0,659
Buchenholz	frisch	0,982
	trocken	0,590
Edeltanne	frisch	0,890
	trocken	0,555
Erlenholz	frisch	0,857
	trocken	0,500
Eschenholz	frisch	0,904
	trocken	0,644
Hainbuchenholz	frisch	0,945
	trocken	0,769
Lindenholz	frisch	0,817
	trocken	0,439
Nußbaumholz		0,677
Cypressenholz		0,598
Cedernholz		0,561
Pappelholz		0,383
Kork		0,240

Dichtigkeit einiger Flüssigkeiten

(bei 0°, wo nichts weiter bemerkt ist).

Destillirtes Wasser	1,000	50 Proc. Säure	1,295
Quecksilber	13,598	60 » »	1,348
Brom	2,966	70 » »	1,398
Schwefelsäure (englische)	1,848	80 » »	1,438
Verdünnte Schwefelsäure		90 » »	1,473
nach Delezenne bei 15° C.:		100 » »	1,500
10 Proc. Säure	1,066	Schwefelkohlenstoff	1,272
20 » »	1,138	Milch	1,030
30 » »	1,215	Meerwasser	1,026
40 » »	1,297	Wein: Bordeaux=	0,994
50 » »	1,387	» Champagner=	0,998
60 » »	1,486	» Malaga=	1,022
70 » »	1,595	» Mosel=	0,916
80 » »	1,709	» Rhein=	0,999
90 » »	1,805	Oele: Citronenöl	0,852
100 » »	1,840	» Leinöl	0,953
Verdünnte Salpetersäure:		» Mohnöl	0,929
10 Proc. Säure	1,054	» Olivenöl	0,915
20 » »	1,111	» Terpentinöl	0,872
30 » »	1,171	Alkohol, absoluter	0,793
40 » »	1,234	Schwefeläther	0,715

Viertes Kapitel.

Molekularwirkungen zwischen festen und flüssigen Körpern, sowie zwischen den einzelnen Theilchen der Flüssigkeiten selbst.

Adhäsion zwischen festen und flüssigen Körpern. Zwischen festen 40
und flüssigen Körpern finden ähnliche Adhäsionserscheinungen Statt, wie zwischen festen Körpern, d. h. die Flüssigkeiten haften mehr oder weniger stark an

den Oberflächen fester Körper. Spritzt man z. B. einige Wassertropfen gegen eine vertikal stehende Glasscheibe, so werden sie zum Theil daran hängen bleiben und nicht herunterlaufen, wie es der Fall seyn würde, wenn der Schwerkraft der Tropfen nicht durch eine andere Kraft, nämlich durch die Anziehung, welche zwischen den Theilchen der Flüssigkeit und der Oberfläche der Glaswand stattfindet, das Gleichgewicht gehalten würde.

Diese Adhäsion ist auch die Ursache, daß Flüssigkeiten, die man aus einem Gefäße ausgießen will, so leicht an der äußeren Wand herablaufen. Um dies zu verhüten, bestreicht man den äußeren Rand der Gefäße mit Fett, oder man läßt die ausfließende Flüssigkeit an einem benetzten Glasstäbchen herablaufen.

41 **Haarröhrchen.** Es ist oben gesagt worden, daß die freie Oberfläche einer Flüssigkeit, welche sich in irgend einem Gefäße befindet, eine horizontale Ebene sey. Dies ist jedoch nur in so fern wahr, als die Molekularwirkungen an den Gefäßwänden keinen störenden Einfluß ausüben. In der Nähe der Wände finden jederzeit Abweichungen von der normalen Oberfläche Statt.

Wenn man das eine Ende eines engen Glasröhrchens in eine Flüssigkeit eintaucht, so steht das Niveau der Flüssigkeit im Röhrchen nie in gleicher Höhe mit dem Spiegel der Flüssigkeit außerhalb. In Wasser z. B. eingetaucht, erhebt sich die Flüssigkeitssäule im Röhrchen (Fig. 88); wenn man hingegen das Glasröhrchen in Quecksilber eintaucht, so steht der Gipfel der Quecksilbersäule im Röhrchen tiefer (Fig. 89).

Fig. 88.

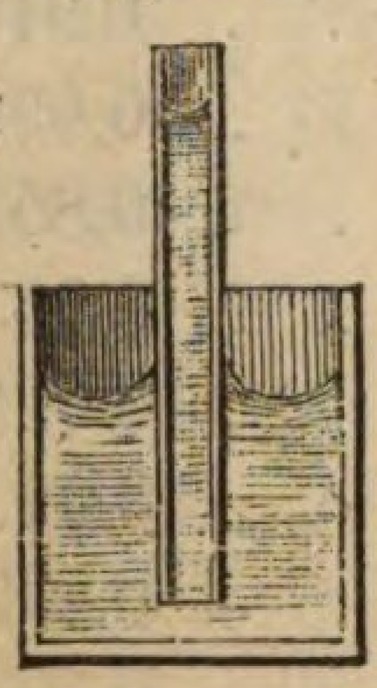
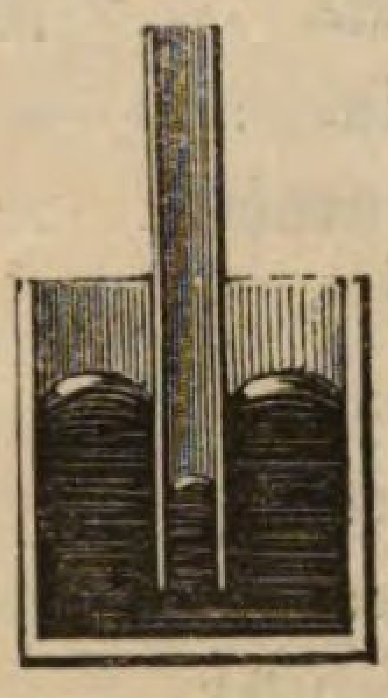


Fig. 89.



Diese Erscheinungen der Hebung und Senkung werden mit dem Namen der Capillarerscheinungen bezeichnet, die Kraft aber, welche sie hervorbringt, heißt Capillarattraction, oder auch bloß Capillarität. Diese Kraft wirkt nicht bloß, um die Flüssigkeit im Röhrchen zu heben oder zu senken, sie wirkt überall, wo Flüssigkeiten mit festen Körpern, Flüssigkeiten unter sich, oder feste Körper unter sich in Berührung sind, oder allgemein, wo die kleinsten Theilchen der ponderabeln Materie einander berühren.

Es ist leicht, sich durch den Versuch davon zu überzeugen, daß die Höhendifferenz zwischen dem Gipfel der Flüssigkeit im Röhrchen und dem Spiegel der Flüssigkeit außerhalb desselben um so größer ist, je enger die Röhrchen sind. Taucht man zwei Röhrchen, von denen das eine einen doppelt so großen Durchmesser hat als das andere, in Wasser, so wird das Wasser im engeren doppelt so hoch steigen, taucht man sie in Quecksilber, so wird im engeren das Quecksilber doppelt so tief niedergedrückt. Ueberhaupt verhalten sich die Niveaudifferenzen der Flüssigkeit in und außer der Röhre umgekehrt wie die Durchmesser der Röhrchen.

Die Höhe der gehobenen Säulchen hängt auf die eben angegebene Weise von dem Durchmesser der Röhren ab, die Dicke und die Substanz der Röhren

wände ist aber gleichgültig, wenn sie nur von der Flüssigkeit benetzt wird; dagegen hängt die Höhe wesentlich von der Natur der Flüssigkeit ab. Folgendes ist die Erhebung in einer Röhre von 1 Millimeter Durchmesser für drei verschiedene Flüssigkeiten:

Wasser	29,79	Millimeter
Alkohol (specifisches Gew. 0,8135)	9,15	»
Terpentinöl	12,72	»

Es ist nun noch zu erwähnen, daß, wenn eine Flüssigkeit in einem engen Rohre aufsteigt, der Gipfel der flüssigen Säule immer hohl ist, wie Fig. 90 zeigt. Wenn hingegen eine Depression stattfindet, so nimmt der Gipfel der Flüssigkeit eine gewölbte Gestalt, wie Fig. 91, an. Diese Gestalten sind wesentlich mit der Hebung oder Senkung verbunden, denn wenn man etwa die inneren Wände einer Röhre mit einer fettigen Substanz überzieht und sie dann ins Wasser taucht, so erhält man einen convexen Meniskus, gerade so als ob man eine gewöhnliche Glasröhre in Quecksilber taucht. Es geht daraus hervor, daß die Differenzen des Niveaus von der Form des Meniskus abhängen, und daß also alle zufälligen Ursachen, welche verhindern, daß der Meniskus seine regelmäßigen Formen annimmt, auch die Höhe der Säulen modificiren. Wenn z. B. eine Röhre im Innern nicht vollkommen rein und glatt ist, so bilden sich zahnartige Einschnitte am Rande des Meniskus, und man erhält alsdann, wenn man den Versuch mehrmals wiederholt, sehr verschiedene Resultate.

Fig. 90.

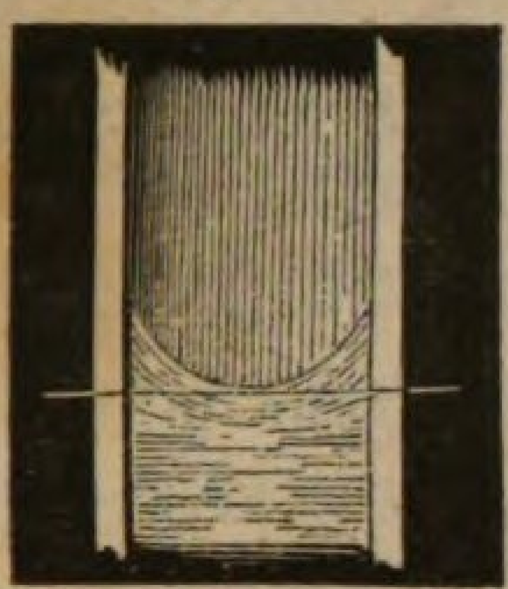
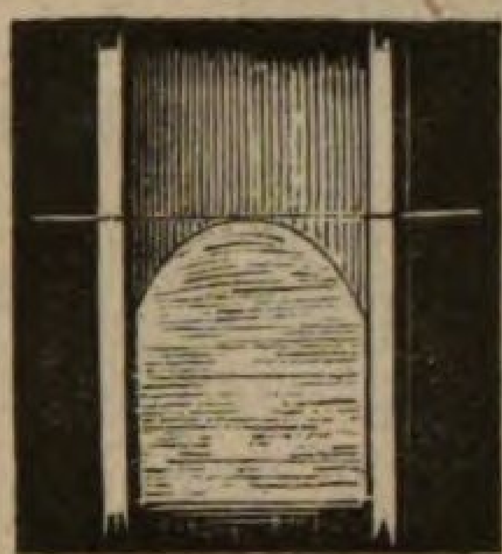


Fig. 91.



Auf der Wirkung der Haarröhrchen beruht das Aufsteigen einer Flüssigkeit in Löschpapier, die Wirkung der Kerzen- und Lampendochte, das Ausblühen (Effloresciren) gesättigter Salzlösungen u. s. w. Die Gefäße der Pflanzen, welche den Saft aus den Wurzeln in die Höhe führen, sind außerordentlich fein und bewirken schon dadurch ein Aufsteigen der Flüssigkeit.

Zusammenhang zwischen den Theilchen einer Flüssigkeit. 42
Wenn die Flüssigkeiten auch keine selbstständige Gestalt haben, wenn sich auch die einzelnen Theilchen ungemein leicht an einander verschieben lassen, so hört deshalb doch noch nicht jeder Zusammenhang zwischen ihnen auf, wie dies schon aus der Tropfenbildung hervorgeht. Gießt man etwas Wasser auf eine mit Bärlappsamen (semen lycopodii) bestäubte Fläche oder etwas Quecksilber in ein Porcellangefäß, so bilden sich fast kugelförmige Tröpfchen. Wenn gar kein Zusammenhang zwischen den einzelnen Theilchen des Wassers und des Quecksilbers bestände, so müßten die Theilchen gleichsam wie Staub auseinander fallen; bei langsamem Ausgießen von Flüssigkeiten aus irgend einem Gefäße würden sie nicht in einzelnen Tropfen herabfallen; ein solcher Tropfen fällt erst, wenn sein Gewicht groß genug ist, um gleichsam ein Abreißen von der übrigen Masse der Flüssigkeit zu bewirken.

Die Cohäsion, welche zwischen den einzelnen Theilchen einer Flüssigkeit stattfindet, läßt sich direct messen. Wenn eine feste Scheibe auf die Oberfläche einer Flüssigkeit gesetzt wird, so kann man sie in horizontaler Stellung nicht mehr in die Höhe ziehen, wie wenn sie frei in der Luft hinge; es ist, um sie in die Höhe zu ziehen, eine mehr oder minder große Kraft nöthig. Um diese Kraft zu messen, bedient man sich der Wage. An der einen Seite hängt man eine horizontale Scheibe an, auf der anderen Seite legt man ein Gegengewicht auf, welches sie im Gleichgewicht hält. Wenn das Gleichgewicht hergestellt ist, nähert man der Scheibe von unten die Oberfläche einer Flüssigkeit, bis die Flüssigkeit die untere Fläche der Scheibe gerade berührt, dann legt man, ohne zu stoßen, auf der anderen Seite Gewichte auf und bemerkt, wie viel nöthig ist, um die Scheibe von der Flüssigkeit abzureißen.

Um eine Glasscheibe von 118^{mm} Durchmesser abzureißen, sind für verschiedene Flüssigkeiten verschiedene Gewichte nöthig, und zwar für

Wasser	59 Gramm
Alkohol	31 »
Terpentinöl . . .	34 »

Eine Scheibe von gleichem Durchmesser aus Kupfer oder irgend einer Substanz verfertigt, welche von der Flüssigkeit benetzt wird, giebt genau dieselben Resultate. Die Adhäsion ist also wie die Capillarität unabhängig von der Natur der festen Körper und hängt nur von der Natur der Flüssigkeit ab. Es ist leicht den Grund davon einzusehen, denn beim Aufziehen bleibt immer eine Schicht der Flüssigkeit an der Scheibe hängen; man hat also durch das Uebergewicht auf der anderen Seite nicht die Flüssigkeit von der festen Scheibe, sondern die Moleküle der Flüssigkeit von einander getrennt, man hatte also die Cohäsion der Flüssigkeit zu überwinden. Die in Rede stehenden Versuche geben also ein Maaß für die Cohäsion der Flüssigkeiten, also für die Attraction, welche zwischen den Theilchen derselben stattfindet, und man sieht, daß diese Attraction sehr bedeutend ist und daß sie sich in der Natur der Flüssigkeiten ändert.

Wenn die Oberfläche der Scheibe nicht von der Flüssigkeit benetzt wird, wie es z. B. der Fall ist, wenn man eine Glasscheibe auf Quecksilber setzt, so drückt das Zulaggewicht, welches das Abreißen bewirkt, nicht mehr die Cohäsion der Flüssigkeit aus.

Um eine Glasscheibe von den eben erwähnten Dimensionen von Quecksilber abzureißen, ist eine Kraft von ungefähr 200 Gramm nöthig. Daraus geht hervor, daß selbst, wenn ein fester Körper nicht von einer Flüssigkeit benetzt wird, doch zwischen den Molekülen der Flüssigkeit und denen des festen Körpers eine mehr oder minder große Anziehung stattfindet, nur ist in diesem Falle die Cohäsion der Flüssigkeit größer als die Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und dem festen Körper.

Die bisher in diesem Kapitel betrachteten Erscheinungen lassen sich auf folgende Weise unter einem theoretischen Gesichtspunkte zusammenfassen.

Quecksilber bildet auf Papier, Wasser auf einer fettigen oder bestäubten Fläche kugelförmige Tropfen. Gewöhnlich erklärt man diese Erscheinung aus der allgemeinen Attraction aller Moleküle unter sich, gerade wie man die sphärische Bildung der Himmelskörper erklärt. Diese Erklärung aber ist deshalb unzulässig, weil die molekulare Attraction ganz anders wirkt als die allgemeine Schwere; weil sie, nur in unmerklichen Entfernungen auf die nächsten Moleküle wirkend, sich nicht so summiren kann, daß gleichsam ein Anziehungsmittelpunkt, dem Gravitationsmittelpunkt der Weltkörper ähnlich, gebildet wird. Die folgende Erklärung scheint richtiger zu seyn.

In einer Flüssigkeit müssen die Moleküle in einer solchen Entfernung verharren, daß Attraction und Repulsion einander neutralisiren. Es ist dies nur dann möglich, wenn die Moleküle in parallelen Schichten gelagert sind, in der Art, daß jedes Molekül von zwölf anderen umgeben ist, ungefähr so wie man gewöhnlich die gleich großen Kanonenkugeln zu lagern pflegt. Diese Anordnung ist dann nicht im Mindesten gestört, wenn die Flüssigkeit auch eben endigt. Jedes Molekül ist hier nach allen Seiten hin vollkommen gleichen Einwirkungen unterworfen, alle Moleküle sind hier in vollkommen gleichen Entfernungen von einander. Diese Anordnung mag die normale Lagerung der Moleküle heißen. Wird ein Theil der Gränzfläche gekrümmt, so kann der gegenseitige Abstand der Moleküle nicht mehr gleich weit bleiben, und eine solche Lagerung mag anomal genannt werden.

Sobald durch irgend eine äußere Kraft die normale Lagerung der Moleküle gestört wird, wird auch das bisher vollständige Gleichgewicht gestört, es entsteht eine Spannung, welche den gestörten Parallelismus der Schichten wieder herzustellen strebt und welche die Flüssigkeitstheilchen sogleich wieder in die normale Lagerung zurückführt, sobald die störende Ursache zu wirken aufhört. Wenn man ein Stäbchen, welches von der Flüssigkeit benetzt wird, in dieselbe eintaucht, so kann man durch langsames Herausziehen einen Hügel bilden, der nach dem Abreißen sogleich wieder in die Ebene zurückeilt. Dies könnte nun freilich bloß Folge der Schwere seyn, allein dasselbe findet in der umgekehrten Lage der Ebene Statt. Füllt man ein Röhrchen, welches nicht über drei Linien Durchmesser hat und nur an einem Ende offen ist, ganz mit Wasser, so kann man es umdrehen, ohne daß das Wasser ausläuft. Es bildet eine hängende Ebene, an der man wie vorher Hügel herausziehen kann, die sich nach dem Abreißen, der Schwere entgegen, in die Ebene zurückziehen.

Eine tropfbare Flüssigkeit strebt also in einer Ebene zu endigen. Nun aber kann eine ringsum freie Masse nicht durch eine einzige Ebene begränzt werden. Wäre sie durch ebene Flächen begränzt, so würden die Kanten durch die Spannung der Moleküle in denselben bald abgeflacht werden; ist aber die Masse durch eine krumme Oberfläche begränzt, deren Krümmung nicht an allen Stellen gleich ist, so würde an den stärker gekrümmten Theilen der Oberfläche nothwendig auch eine stärkere Spannung stattfinden, welche die Abrundung zur voll-

kommenen Kugel zur Folge hat. Auf dieselbe Weise geht auch die Abrundung der Blase vor sich.

Die oberflächlichen Moleküle einer ringsum freien tropfbaren Flüssigkeit bilden demnach ein die innere Masse kräftig zusammendrückendes Netzwerk. Hat man eine kleine Seifenblase gemacht, so behält diese ihre Größe bei, wenn man die Oeffnung des Röhrchens zuhält; sobald man aber öffnet, verkleinert sich die Blase mehr und mehr. Wäre die Luft in der Blase nicht durch die umschließende Flüssigkeitsschicht zusammengedrückt gewesen, wäre sie nicht dichter als die sie umgebende Atmosphäre, so würde sie in der Blase bleiben und nicht dem atmosphärischen Luftdruck entgegen in das Röhrchen gedrängt werden.

Wird Quecksilber in ein Glas gebracht, so steht es von seinen Wänden, wenn auch nicht merklich, ab; bringt man jedoch Wasser oder Baumöl darauf, so dringt dies in den Zwischenraum ein. Auch sickert bei schlecht ausgekochten Barometern Luft durch diesen Zwischenraum in die Toricelli'sche Leere. Das Quecksilber bildet also in dem Glase einen frei liegenden großen Tropfen, dessen Form nur durch die Gefäßwände bedingt ist. Er endet oben mit einer horizontalen Fläche, die aber nicht bis an die Wand reichen kann, weil die scharfe Kante des Tropfens, wie wir oben gesehen haben, abgerundet wird.

Bringt man einen Tropfen Quecksilber in ein vollkommen cylindrisches Glasröhrchen, welches horizontal gestellt ist, so bildet er einen an beiden Enden abgerundeten Cylinder. Es kann aber durchaus keine Bewegung entstehen, weil die Convexität an beiden Enden gleich ist.

Ist aber das Röhrchen konisch, so ist der Quecksilberfaden am engeren Ende mehr gekrümmt; hier wirkt also die Spannung der anomal gelagerten Moleküle stärker als auf der anderen Seite, und die Folge dieser überwiegenden Spannung ist, daß sich der Quecksilberfaden nach dem weiteren Ende hin bewegt.

Fig. 92.



Füllt man ein Röhrchen ganz mit Quecksilber, legt man es horizontal hin, läßt man das eine Ende des Quecksilberfadens mit einem Tropfen Quecksilber zusammenfließen, so vergrößert sich der Tropfen, und das Quecksilber tritt zuletzt ganz aus dem Röhrchen heraus und vereinigt sich ganz mit dem Tropfen. Der Grund davon ist leicht einzusehen. Durch die starke Krümmung der Convexität am Ende des Quecksilbercylinders entsteht von dieser Seite ein weit stärkerer Druck auf die Masse als von der Seite des Tropfens.

Taucht man ein Quecksilberröhrchen vertikal in Quecksilber, so wird es im Röhrchen tiefer stehen als außen, weil die starke Convexität des Quecksilbercylinders in der Röhre deprimirend wirkt. Es ist auch klar, daß die Depression um so größer seyn muß, je enger die Röhre ist.

Wenn eine Flüssigkeit an den Gefäßwänden anhängt, dieselben benetzt, so kann sie nicht mehr, wie im vorigen Falle, als ein großer Tropfen betrachtet werden, die Oberfläche kann also auch nicht, wie dort, eine convexe Gestalt annehmen. Die Moleküle der Gefäßwand, welche mit der Flüssigkeit in Berüh-

rung sind, wirken auf die Flüssigkeit gerade so wie die Flüssigkeitsmoleküle auf einander. Die festen Gefäßwände sind demnach nur als eine starre Fortsetzung der Flüssigkeit zu betrachten. Die über der Flüssigkeit im Gefäße befindliche Luft muß demnach als eine Blase angesehen werden, die unten von der Flüssigkeit, auf den Seiten durch die Gefäßwände begränzt ist. Wäre die Oberfläche der Flüssigkeit vollkommen eben, so würde die Blase da, wo Flüssigkeit und Gefäßwand zusammentrifft, eine scharfe Kante haben, welche alsbald durch die gegenseitige Anziehung der Moleküle, der Wand und der Flüssigkeit abgerundet werden muß; da aber die Moleküle des Gefäßes fest sind, so bleibt nichts übrig, als daß die Oberfläche der Flüssigkeit eine concave Gestalt annimmt, indem Moleküle der Flüssigkeit an den Wänden aufsteigen. Bei der Blase aber bewirkt die Spannung der anomal gelagerten Wassermoleküle einen Druck auf die eingeschlossene Luft; so wird denn auch hier die concave Flüssigkeitsoberfläche gegen die Luft der Blase, also nach oben, einen Druck ausüben.

Ein Tropfen Wasser in einer horizontalen cylindrischen Glasröhre wird einen an beiden Enden concaven Cylinder bilden, der sich nicht bewegt, weil die Concavitäten an beiden Enden gleich sind. Ist das Röhrchen konisch, so ist natürlich die eine Concavität stärker gekrümmt als die andere, und durch die überwiegende Spannung der stärker gekrümmten wird das Wasser nach dem engeren Theile der Röhre hingezogen. Ebenso erklärt sich leicht aus der Wirkung der concaven Oberfläche das Aufsteigen des Wassers in einem Röhrchen, welches vertikal in Wasser eingetaucht wird.

Fig. 93.



Schwimmt eine hohle gläserne Kugel auf Wasser, so fängt dieses schon in einem Abstand von mehr als 6 Linien von der Kugel an, sich rings herum gegen dieselbe zu heben. Bringt man eine zweite Glaskugel einen Zoll weit von der ersten in das Wasser, so nähern sich die Kugeln anfangs langsam, dann schneller und schneller, bis sie endlich an einander stoßen. Wären beide Kugeln fest gewesen, so würde in Folge des Bestrebens der Ebenebildung das Wasser zwischen den Kugeln gestiegen seyn; da sie aber beweglich sind, so muß die an

Fig. 94.

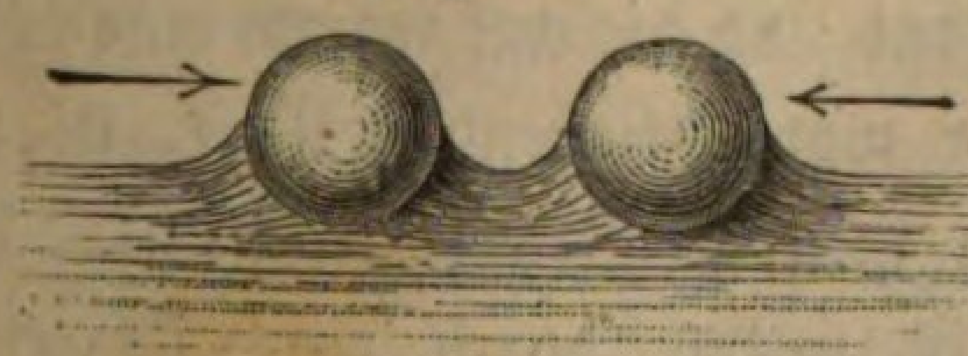
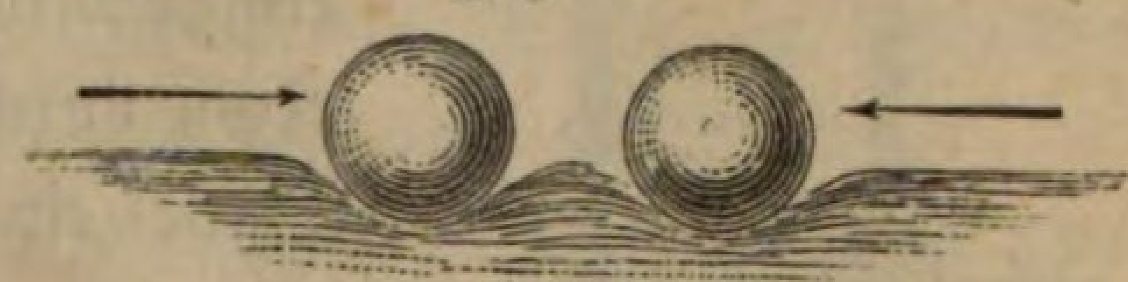


Fig. 95.



sie gleichsam angeheftete und durch ihre Schwere sinkende Wasserfläche, welche sich zwischen ihnen befindet, die Kugeln gegen einander ziehen.

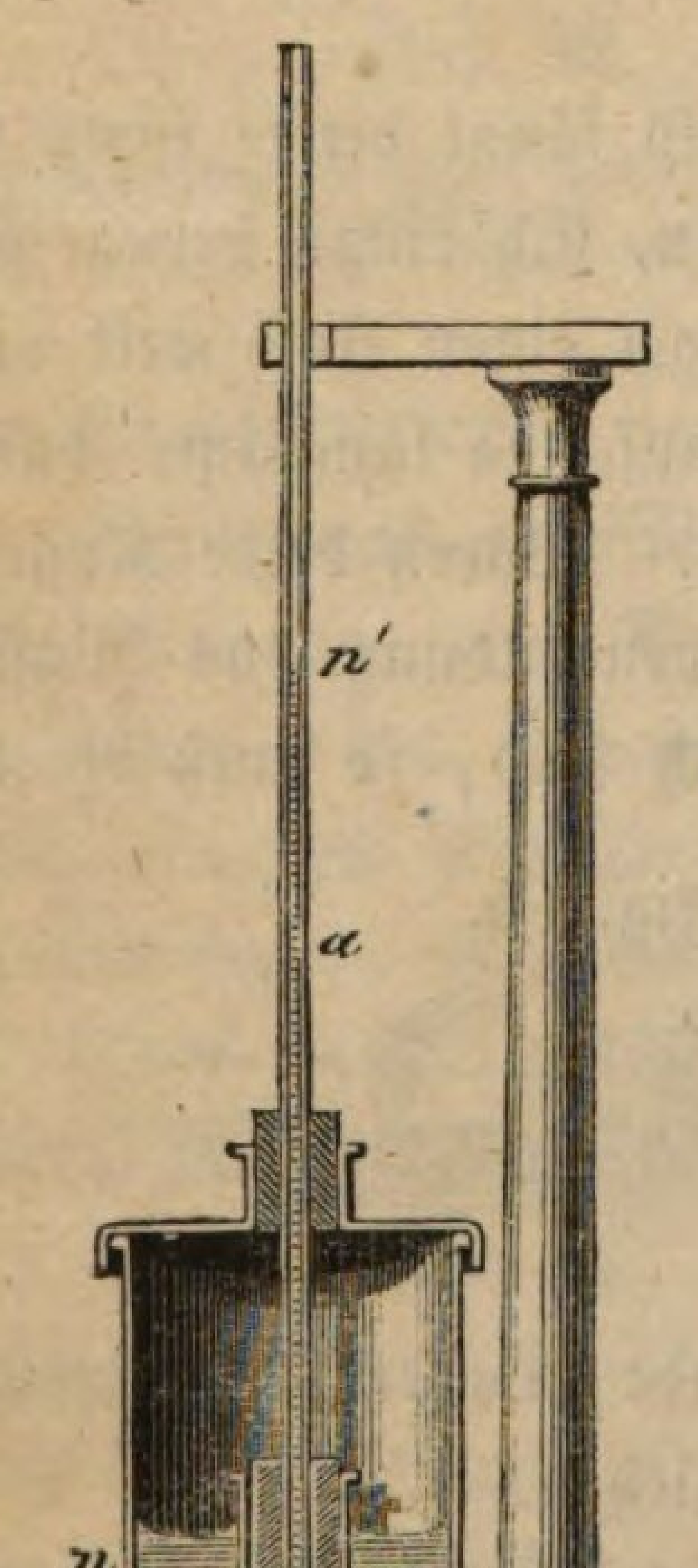
Elasticität der Flüssigkeiten. Auch die tropfbar flüssigen Körper 43
sind in gewisser Beziehung elastisch, denn sie lassen sich durch einen sehr starken Druck, wenn auch nur sehr wenig, auf ein kleineres Volumen zusammenpressen, und wenn der Druck nachläßt, nehmen sie ihr ursprüngliches Volumen wieder ein. Zuerst hat Oersted, später haben Colladon und Sturm Versuche über

die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten angestellt. Die nähere Beschreibung der von ihnen hierüber angestellten Versuche würde uns zu weit führen. Durch den Druck einer Atmosphäre (dieser Ausdruck wird im folgenden Kapitel seine Erklärung finden) läßt sich Quecksilber ungefähr um 3, Wasser um 48 Milliontheile seines Volumens zusammenpressen.

44 **Die Endosmose.** Wenn zu einer concentrirten wässerigen Auflösung irgend einer Substanz noch mehr Wasser zugesetzt wird, so zieht dieses nach und nach die Theilchen des aufgelös'ten Körpers an sich, bis eine vollkommen gleichförmige Vertheilung stattfindet. Wenn aber das Wasser und die Lösung nicht in unmittelbarer Berührung, sondern durch irgend einen porösen Körper getrennt sind, so müssen die Flüssigkeiten durch diese Wand zu einander übergehen, und da es nun möglich ist, daß die poröse Wand die eine Flüssigkeit leichter durchläßt als die andere, so muß die Menge der Flüssigkeit auf der einen oder der anderen Seite zunehmen. Füllt man z. B. eine unten mit einer Blase zugebundene Glasröhre mit einer concentrirten Lösung von Kupfervitriol, taucht man dann die durch die Blase verschlossene Oeffnung in ein Gefäß mit Wasser, so dringt das Wasser allmälig durch die Blase in die Röhre, so daß in der Röhre die Flüssigkeit steigt, während sie außen sinkt. Umgekehrt sinkt die Flüssigkeit in der Röhre, wenn das Wasser innen, die Lösung des Kupfervitriols außen ist. Etwas von der Lösung des Kupfervitriols dringt freilich auch durch die Blase zum Wasser, wie man bald an der Färbung erkennt.

Aehnliche Erscheinungen beobachtet man, wenn man in die Röhre Alkohol gießt und sie in Wasser taucht. Nach einiger Zeit sieht man, daß das Niveau der Flüssigkeit in der Röhre gestiegen ist.

Fig. 96.



Man bezeichnet diesen Austausch von Flüssigkeiten durch eine poröse Scheidewand hindurch mit dem Namen der Endosmose.

Um die Zunahme des Volumens auf der einen Seite recht auffallend zu machen, dient der Fig. 96 dargestellte Apparat, welcher Endosmometer genannt wird; *a* ist eine Glasröhre, deren innerer Durchmesser einige Millimeter beträgt und die auf irgend eine Weise, etwa durch einen sehr wohlschließenden Kork, in dem Halse eines weiteren Glasgefäßes befestigt ist. Dieses weitere Gefäß ist unten durch eine Thierblase verschlossen. Dieser mit der einen Flüssigkeit gefüllte Apparat wird nun in ein weiteres Gefäß, welches die andere Flüssigkeit enthält, eingesetzt, ohne daß jedoch die Blase auf dem Boden des Gefäßes *n* aufsitzt.

Das Gefäß *b* sammt der Röhre *a* sey z. B. mit Weingeist gefüllt, das untere Gefäß enthalte Wasser.

Sobald das Gefäß *b* eingesetzt ist, wird sich alsbald ein mechanisches Gleichgewicht zwischen der inneren und äußeren Flüssigkeit und der Spannung der Blase herstellen. Es sey bei *n* das Niveau des Wassers, bei *n'* der Gipfel der Weingeistsäule in der Röhre. Nach einer Viertelstunde beobachtet man schon eine bedeutende Veränderung, die Flüssigkeit ist nämlich schon um einige Millimeter über *n'* hinaus gestiegen, und dieses Steigen dauert fort. Wenn die Röhre selbst 4 bis 5 Decimeter hoch ist, so läßt sich erwarten, daß die Flüssigkeit nach einem Tage den Gipfel erreicht hat, um oben auszufließen. Das Wasser ist also trotz des Druckes, welchen der Alkohol in Folge seiner Schwere auf die Blase ausübt, durch die Poren derselben in das Gefäß *b* eingedrungen; es hat also eine Endosmose des Wassers zum Alkohol durch die Blase hindurch stattgefunden. Macht man den Versuch in umgekehrter Ordnung, indem man das Wasser innen, den Alkohol außen hinbringt, so sinkt das Niveau in der Röhre, während es außen steigt.

Wenn man in ein Gefäß von ungebranntem Thon (etwa eine poröse Thonzelle, wie sie zu Grove's und Bunsen's galvanischen Batterieen gebraucht werden) Schwefelsäure gießt und es dann in ein anderes Gefäß mit Wasser stellt, so findet eine ähnliche Erscheinung Statt; das Wasser sickert durch den Thon durch, das Niveau der Flüssigkeit im Innern der Thonzelle steigt, während es außen sinkt.

Die Wirkung der Endosmose dauert fort, wenn auch allmälig immer schwächer, bis die Flüssigkeiten zu beiden Seiten der Scheidewand ganz gleichartig sind.

Daß der Spiegel der Flüssigkeit auf der einen Seite so hoch über das Niveau auf der anderen Seite steigen kann, rührt daher, daß die Poren der Scheidewand zu fein sind, als daß ein hydrostatischer Druck sich durch dieselben fortpflanzen könnte. Wenn man Wasser in eine poröse Thonzelle gießt, so werden die Wände zwar feucht, aber das Wasser tropft nicht durch, und eine Thierblase, welche gleichfalls vom Wasser befeuchtet wird, kann nicht zum Filtriren des Wassers gebraucht werden.

Welche der getrennten Flüssigkeiten an Volumen zunimmt, hängt lediglich von der Natur der trennenden Scheidewand ab; wenn Wasser und Weingeist durch eine Kautschukplatte getrennt sind, so nimmt das Wasser an Volumen zu, indem der Weingeist leichter durch den Kautschuk wandert als Wasser.

Alle zu endosmotischen Versuchen brauchbaren Scheidewände sind von unzählig vielen ausnehmend feinen Poren durchzogen, welche zu fein sind, als daß sich durch dieselben ein hydrostatischer Druck fortpflanzen kann. — Wird eine solche Zwischenwand in eine Flüssigkeit getaucht, so wird, je nach der Molekularanziehung, welche zwischen der Membran und der Flüssigkeit besteht, eine größere oder kleinere Menge der Flüssigkeit resorbirt und zurückgehalten werden.

Ueber die Resorption von Flüssigkeiten durch thierische Blasen hat Liebig Versuche angestellt, welche den Vorgang bei den endosmotischen Erscheinungen sehr schön erläutern.

100 Gewichtstheile trockene Ochsenblase nehmen in 24 Stunden auf:

268	Gewichtstheile	Wasser
133	»	Kochsalzlösung (1,204 specif. Gew.)
38	»	Weingeist (84 Proc.)
17	»	Knochenöl.

Das Absorptionsvermögen der thierischen Membranen für verschiedenartige Flüssigkeiten ist also sehr ungleich. In Wasser gelegt, quillt die Blase auf und wird weich, in Alkohol bleibt sie hart.

Wenn eine Blase, welche irgend eine Flüssigkeit resorbirt hat, mit einer Substanz in Berührung gebracht wird, welche gleichfalls eine Anziehung auf die Theilchen der resorbirten Flüssigkeit äußert, so wird ein Theil dieser Flüssigkeit der Blase entzogen.

Wenn z. B. eine mit Wasser gesättigte Blase mit Kochsalz bestreuet wird, so entsteht überall da, wo das Salz mit dem Wasser in Berührung kommt, welches die offenen Poren erfüllt, eine gesättigte Salzlösung; da aber die Resorptionsfähigkeit der Blase für Salzlösung geringer ist als für reines Wasser, so tritt ein Theil der Flüssigkeit aus und fließt in Tropfen ab; dabei schrumpft die Blase zusammen.

Wird ein Stück mit Wasser gesättigter Blase in Alkohol gelegt, so verliert sie in 24 Stunden ungefähr die Hälfte ihres Gewichtes, was von einem Zusammenschrumpfen und Hartwerden der Blase begleitet ist.

Diese Thatsachen erläutern nun den Vorgang der Endosmose ganz vortrefflich.

Wenn eine Membran zur Trennung zweier Flüssigkeiten dient, so wird sie von jedem der getrennten Stoffe durch Molekularanziehung, durch Resorption in sich aufnehmen; die resorbirte Flüssigkeit wird aber nach der anderen Seite der Blase wieder austreten, weil sie von dort her durch eine chemische Anziehung den Poren der Blase entzogen wird. Dieser Proceß wird fortdauern, bis die auf beiden Seiten befindlichen Flüssigkeiten einander gleich geworden sind.

Fünftes Kapitel.

Vom Gleichgewicht der Gase und dem atmosphärischen Druck.

45 Die Luft ist ein Körper, welcher nicht unmittelbar so auf die Sinne wirkt wie die festen und tropfbar flüssigen Körper, aber sie erscheint uns in so vielen Phänomenen auf der Erde, über den Gewässern, daß wir nicht nöthig haben, nach anderen Beweisen ihrer Existenz zu suchen. Es giebt Gewitter in allen Klimaten und Stürme auf allen Meeren; die Luft umgiebt also den ganzen Erdball, überall bildet sich eine Schicht von großer Dicke, denn überall, über

Ebenen wie über Bergen, sieht man Wolken dahinziehen, welche vom Winde fortgetrieben werden. Ueber den Wolken sieht man die prachtvolle Farbe des Himmels, welche ein Beweis für die Höhe der Luft ist, wie die Farbe des Oceans die Tiefe des Wassers beweist. Wenn es keine Luft gäbe, wäre der Himmel ohne Farbe und ohne Glanz; er würde als ein vollkommen schwarzes Gewölbe erscheinen, auf welchem man die Sterne bei Tag erblicken würde wie bei Nacht. Diese ungeheure Luftmasse, welche über der Erde ausgebreitet ist, und welche sich hoch über die Gipfel der höchsten Berge hinaus erstreckt, führt den Namen Atmosphäre. Der höchste Gipfel des Himalaya erhebt sich kaum eine Meile über das Niveau des Meeres, während die Luft sich mindestens bis zu einer Höhe von 6 bis 7 Meilen erhebt.

Schon sehr früh, ja selbst schon vor Aristoteles, vermuthete man, daß 46
die Luft schwer sey. Diese Wahrheit wurde jedoch erst 1640 durch Galiläi bewiesen, und etwas später durch Toricelli's schöne Versuche bestätigt. Durch folgenden Versuch läßt sich die Schwere der Luft direct nachweisen: Man macht einen Ballon, welcher mit einem Hahn versehen ist, mittelst der Luftpumpe luftleer, und hängt ihn an dem einen Ende eines Wagebalkens auf, auf die andere Seite legt man Gewichte, bis das Gleichgewicht hergestellt ist. Oeffnet man nun den Hahn, so füllt sich der Ballon wieder mit Luft, das Gleichgewicht wird gestört und die Wage neigt sich nach der Seite des Ballons hin. Auf der anderen Seite muß man von Neuem Gewichte auflegen, um das Gleichgewicht wieder herzustellen, und zwar gerade so viel, als die Luft im Ballon wiegt. Für einen Ballon von 1 Liter beträgt die Differenz der Gewichte mehr als 1 Gramm, woraus als erste Annäherung folgt, daß ein Liter Luft unter den gewöhnlichen Umständen mehr als ein Gramm wiegt, d. h. daß das Wasser nicht ganz 1000mal so schwer ist, als gewöhnliche Luft.

Statt des mit einem Hahn versehenen Ballons kann man folgende ganz wohlfeile Vorrichtung anwenden, welche außerdem noch den Vortheil hat, daß sie bei gleichem Volumen des Ballons weit weniger wiegt, als die eben besprochene. Man wähle einen Ballon von nicht gar dickem Glase und nicht sehr dickem, geradem Halse, Fig. 97, aus. Der Hals wird sorgfältig mit einem wohlverschließenden Kork zugestopft, der in der Mitte durchbohrt ist. Das durch den Kork gehende Loch mag etwa 2 Millimeter Durchmesser haben. Ueber den Kork wird nun Wachstaffet gebunden, wie Fig. 97 und in größerem Maßstabe Fig. 98 zeigt. Auf diese Weise ist der innere Raum des Ballons vollkommen von der äußeren Luft abgesperrt. Neben der Stelle, welche die Oeffnung des Korkes bedeckt, macht man zwei Einschnitte in den Wachstaffet, wie man in Fig. 98 sieht, und so ist der Ballon gewissermaßen mit einem Ventil verschlossen, durch welches Luft aus dem Ballon austreten, aber

Fig. 97.



Fig. 98.



nicht eintreten kann. Bei Anstellung des Versuches wiegt man zuerst den lufterfüllten Ballon; bringt man ihn dann unter die Glocke der Luftpumpe, so wird beim Auspumpen auch die Luft aus dem Ballon heraustreten. Ist er so entleert, so wird abermals gewogen, und man findet nun, daß er leichter geworden ist.

47 Die Molekularkräfte wirken bei Gasen ganz anders, als bei festen und tropfbar flüssigen Körpern. Wir haben gesehen, daß diese Kräfte die Moleküle der festen Körper ganz fest zusammenhalten, und zwar so, daß sie ihre gegenseitige Lage nicht ändern. Auch die Moleküle tropfbar flüssiger Körper halten sie zusammen, jedoch nur so, daß ihnen noch große Freiheit bleibt, nach allen Richtungen hin sich aneinander zu verschieben. Bei den Gasen aber wirken die Molekularkräfte repulsiv, die Moleküle gasförmiger Körper haben ein Bestreben, sich gegenseitig von einander zu entfernen, und in der That entfernen sie sich auch so weit von einander, bis äußere Hindernisse eine weitere Ausdehnung unmöglich machen. Die Luft, welche in einem Gefäße enthalten ist, drückt also fortwährend gegen die Wände.

Dies Bestreben der Luft, sich auszudehnen, wird leicht durch folgenden Versuch nachgewiesen. Man legt unter die Glocke der Luftpumpe eine nur wenig Luft enthaltende und deshalb runzlige Thierblase, deren Oeffnung fest zugebunden ist. Nach einigen Kolbenzügen schon bläht sich die Blase auf und ist endlich gerade so straff angespannt, als ob man mit aller Gewalt Luft hineingeblasen hätte. Läßt man die Luft wieder in den Recipienten hineintreten, so schrumpft die Blase wieder zusammen. Die in der Blase eingeschlossene Luft hat also wirklich ein Bestreben sich auszudehnen, nur wird demselben durch die umgebende Luft Widerstand geleistet. Anstatt der Blase hätte man auch ein sehr dünnes, mit einem Korke verschlossenes Glas unter den Recipienten setzen können; entweder würde der Stopfen in die Höhe geschleudert oder das Glas zersprengt worden seyn, vorausgesetzt, daß der Stopfen nicht zu fest sitzt, oder das Glas nicht zu stark ist. Dieser Druck, welchen die Luft gegen die Wände der sie einschließenden Gefäße ausübt, ist dasjenige, was man ihre **Elasticität**, ihre **Spannkraft**, ihre **Tension**, ihre **Expansionskraft** nennt.

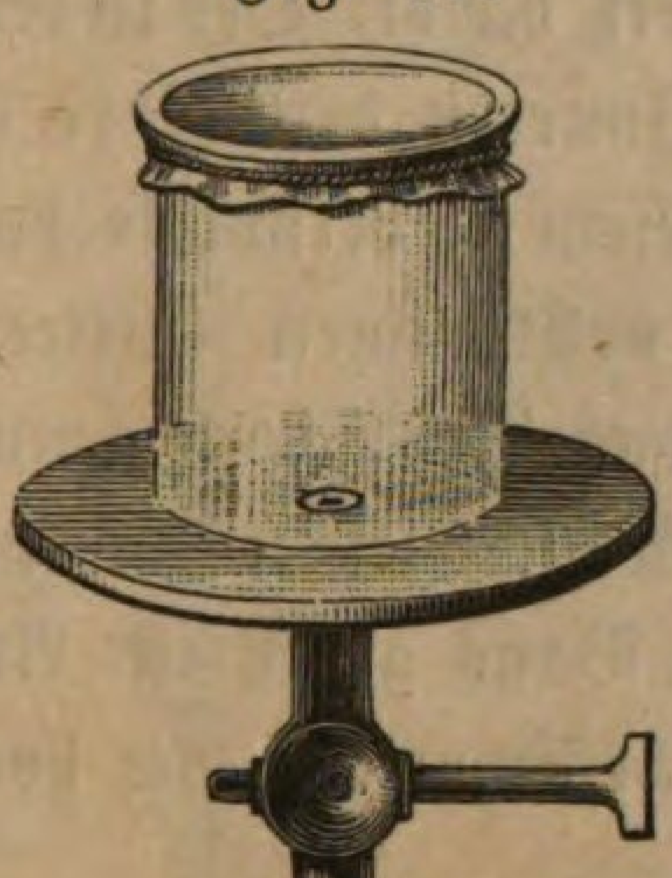
Eine Feder zeigt nur dann Elasticität, wenn man sie zusammendrückt, sie verliert ihre Spannung, sobald sie in ihren ursprünglichen Zustand zurückgekehrt ist. Die Luft hat aber immer eine Expansionskraft, es giebt für sie kein ursprüngliches Volumen, weil sie immer einen größeren Raum einzunehmen strebt. Brächte man ein Liter gewöhnlicher Luft in einen leeren Raum von mehreren Kubikmetern, so würde sie sich in dem ganzen Raume gleichförmig verbreiten, sie würde immer noch ein Bestreben haben, sich auszudehnen und würde also auch noch einen Druck auf die Wände ausüben.

Auf dem Bestreben der Luft, einen möglichst großen Raum einzunehmen, beruht die Einrichtung der Luftpumpe, die wir schon mehrmals angeführt haben und die alsbald näher beschrieben werden wird. Wenn die Luft keine Spannkraft, keine Elasticität in dem eben besprochenen Sinne hätte, so würde sie sich nicht aus dem Recipienten der Luftpumpe verbreiten können; ohne das Bestre-

ben der Luft, sich auszudehnen, würde sie nicht aus dem Ballon, Fig. 97, entweichen können, wenn man auch den von außen auf dem Ventil lastenden Luftdruck wegnimmt.

Aus der Expansionskraft der Gase folgt, daß sie nicht mit einer freien ebenen Oberfläche begränzt seyn können, wie dies bei den Flüssigkeiten der Fall ist. Auf die Luft der Atmosphäre wirken zwei Kräfte, welche sich gegenseitig das Gleichgewicht halten, die Schwere und die Expansionskraft. Durch die Schwere werden die Lufttheilchen nach der Erde angezogen, diese Kraft also äußert ein Bestreben, die Luft auf der Oberfläche der Erde zu verdichten, und diesem Bestreben wirkt die Expansionskraft entgegen. Die Atmosphäre ist wahrscheinlich deshalb begränzt, weil bei einem gewissen Grad der Verdünnung die Expansionskraft so abnimmt, daß die Schwere der Lufttheilchen allein schon hinreicht, eine weitere Entfernung von der Erde zu verhindern.

Fig. 99.



Druck der Luft. Sind einmal die allgemeinen 48
Gleichgewichtsbedingungen festgestellt, so können wir durch directe Versuche beweisen, daß alle unteren Luftschichten in der That durch die oberen gedrückt sind, und daß die Größe dieses Druckes sich ändert, wenn man sich mehr und mehr über das Niveau des Meeres erhebt.

Man setze auf den Teller der Luftpumpe einen Glas- oder Metallcylinder mit etwas dicken Wänden, welcher oben mit einer Thierblase verschlossen ist, die stark angespannt und an dem Rande recht festgebunden seyn muß. Die Blase erleidet von beiden Seiten gleichen Druck und bildet deshalb eine Ebene. Wenn man nun auf irgend eine Weise mehr Luft in den Cylinder hineinbliese, so würde sich die Blase nach außen wölben; zieht man umgekehrt die Luft aus dem Cylinder heraus, so gewinnt der äußere Luftdruck das Uebergewicht und drückt die Blase nach innen. Letzteres läßt sich leicht mit Hülfe der Luftpumpe bewerkstelligen. Bei den ersten Kolbenzügen schon wird die Blase nach innen gekrümmt; je mehr man auspumpt, desto mehr nimmt die Krümmung zu, bis sie endlich in Stücke reißt, wobei man einen Knall wie einen Pistolenschuß hört. Dieser Knall wird durch das heftige Eindringen der Luft hervorgebracht; man kann sich aus der Kraft dieses Eindringens einen Begriff von der Größe des Luftdrucks machen, welcher auf der Blase lag.

Hätte man die ganze Anordnung so geändert, daß die Blase eine schräge Stellung gehabt, oder daß der Luftdruck von unten nach oben gewirkt hätte, so würde man denselben Effect erhalten haben, weil die Luft nach allen Seiten hin auf gleiche Weise drückt.

Dieser Versuch scheint sehr auffallend, weil man nicht begreifen kann, wie die Luft, welche sich in einem Zimmer befindet, einen so enormen Druck ausüben kann. Von dem Gewichte der Luftsäule, welche auf der Blase ruht und sich von derselben bis zu der Decke des Zimmers erstreckt, kann diese Wirkung

nicht herrühren, denn selbst eine Wassersäule von dieser Höhe könnte sie nicht hervorbringen. Hätte man den Versuch unter freiem Himmel angestellt, so hätte die Blase offenbar den Druck einer Luftsäule auszuhalten gehabt, deren Höhe gleich ist der Höhe der ganzen Atmosphäre. Derselbe Druck wirkt aber auch noch im Zimmer, denn die Luft des Zimmers ist ja durch den vollen Atmosphärendruck gepreßt.

49 **Messung des Luftdrucks.** Da die Luft die ganze Erde umgiebt, so preßt sie auf Alles gerade so, wie auf die Blase; sie drückt ebenso auf alle Festländer, wie auf die Gewässer. Taucht man das eine Ende einer auf beiden Seiten offenen Röhre in ein mit Wasser gefülltes Gefäß, so wird sich die Flüssigkeit in der Röhre so hoch stellen, wie außerhalb, weil der Luftdruck in der Röhre gerade so auf das Niveau der Flüssigkeit wirkt, wie außerhalb. Saugt man aber einen Theil der Luft aus der Röhre, so steigt die Flüssigkeit in ihr um so mehr, je länger man saugt. Durch dieses Saugen wird nämlich der Luftdruck im Inneren der Röhre vermindert, während der äußere Luftdruck unverändert bleibt. Der Ueberschuß des äußeren Luftdrucks nun preßt die Flüssigkeit im Inneren der Röhre in die Höhe, bis das Gewicht der gehobenen Wassersäule diesem Ueberschusse das Gleichgewicht hält. Macht man das Innere der Röhre vollkommen luftleer, so muß das Wasser so hoch steigen (vorausgesetzt, daß das Rohr hoch genug ist), daß das Gewicht der gehobenen Wassersäule dem Gewicht einer bis zur Gränze der Atmosphäre reichenden Luftsäule von derselben Basis gleich ist. Auf diese Weise kann man das Gewicht der ganzen Luftsäule bestimmen, wie hoch sie auch seyn mag.

Den Pumpenmachern von Florenz verdanken wir den ersten Keim der Entdeckung dieses wichtigen Gesetzes. Als sie in einem Saugrohre das Wasser über 32 Fuß heben wollten, sahen sie zu ihrem größten Erstaunen, daß es nicht höher stieg. Damals erklärte man das Aufsteigen der Flüssigkeiten, indem man sagte, die Natur habe einen horror vacui. Galiläi genügte eine solche Erklärung nicht, und als ihm die von den Pumpenmeistern gemachte Beobachtung mitgetheilt wurde, kam er gleich auf die Vermuthung, daß die Schwere der Luft die wahre Ursache der Erscheinung sey. Sein Schüler, Toricelli, gab dafür entscheidende Beweise. Er machte ungefähr folgende Schlußfolge. Damit zwei verschiedene Flüssigkeiten sich das Gleichgewicht halten sollen, müssen die Höhen der beiden Säulen sich umgekehrt verhalten, wie ihre Dichtigkeiten. Das Quecksilber ist nahe 14mal so schwer als Wasser. Wenn nun der Druck der atmosphärischen Luft eine Wassersäule von 32 Fuß tragen kann, so muß er demnach auch eine Quecksilbersäule von $^{32}/_{14}$ Fuß, d. h. von nahe 28 Zoll, tragen können. Der Versuch ist leicht anzustellen. Man füllt eine Glasröhre, welche ungefähr 30 Zoll lang und an dem einen Ende verschlossen ist, mit Quecksilber, hält das offene Ende mit dem Finger zu und kehrt die Röhre um. Taucht man das mit dem Finger verschlossene Ende in ein Gefäß mit Quecksilber, Fig. 100, zieht den Finger alsdann weg, so wird das Quecksilber alsbald um einige Zoll fallen und zwar so weit, daß die Erhebung des Quecksil-

bers in der Röhre über das Niveau des Quecksilbers in dem Gefäß so groß ist, wie es aus den eben angeführten Betrachtungen folgt. Die in der Röhre getragene Quecksilbersäule ist als ein Gegengewicht gegen den atmosphärischen Luftdruck zu betrachten. Dieser Apparat ist das **Barometer**. Der leere Raum über der Quecksilbersäule des Barometers ist die **Toricelli'sche Leere**.

Wir können nun die bisher besprochenen Resultate genauer ausdrücken. Die vertikale Höhe des Niveaus in der Röhre über dem Niveau des Gefäßes heißt die **Barometerhöhe**. Sie ist nicht an allen Orten und nicht zu allen Zeiten dieselbe. Am Ufer des Meeres beträgt sie durchschnittlich 76 Centimeter oder, was sehr nahe dasselbe ist, 28 Pariser Zoll. Eine solche Quecksilbersäule von 1 Quadratcentimeter Grundfläche hat einen Kubikinhalt von 76 Kubikcentimeter. Da nun 1 Kubikcentimeter Quecksilber 13,59 Gramme wiegt, so ist der Druck dieser Säule auf ihre Basis 76 × 13,59 Gramme = 1,033 Kilogrammen. Die atmosphärische Luftsäule, welche im Niveau des Meeres auf einen Quadratcentimeter Basis ruht, drückt also auf diese Fläche mit einem Gewichte von 1,033 Kilogrammen, auf einen Quadratzoll ungefähr mit einem Gewicht von 15 Pfund.

Fig. 100.

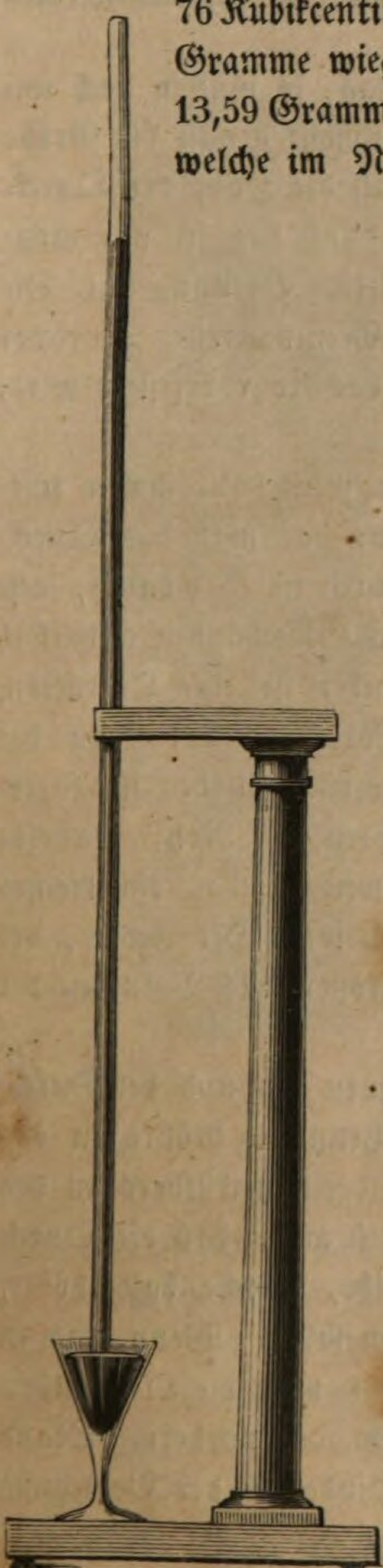


Fig. 101.



Construction des Barometers. 50
Man hat dem Barometer sehr verschiedene Formen gegeben, je nach dem Gebrauche, den man davon machen will. Fig. 101 stellt das **gewöhnliche Barometer** dar; es besteht aus einer Röhre, welche unten gekrümmt, mit einem weiteren Gefäße endigt und auf einem Brette befestigt ist. Die Höhenscala ist in der Regel von Metall. Wenn das Gefäß etwas weit ist in Vergleich zu dem Durchmesser der Röhre, so sind die Schwankungen der Säule fast ohne Einfluß auf das Niveau des Quecksilbers im Gefäß, so daß man, wenn keine große Genauigkeit gefordert wird, dieses Niveau als constant betrachten kann. Bei diesen Barometern, die man zu genauen Untersuchungen nicht brauchen kann, befindet sich in der Regel die Scala auch nur am oberen Theil des Instruments.

Auf Reisen wird jetzt fast nur das Heberbarometer angewandt, weil es genaue Resultate giebt, leicht beobachtet und vor allen Dingen leichter transportirt werden kann, als alle anderen Barometer. Der offene Schenkel hat nur eine capillare Oeffnung, groß genug, um die Luft frei eintreten zu lassen, aber zu klein, als daß das Quecksilber durch dieselbe auslaufen könnte. Man kann es also umkehren, ohne fürchten zu müssen, daß man Quecksilber verliere.

Bei diesen Barometern hat die untere Quecksilberkuppe, welche dem Druck der atmosphärischen Luft ausgesetzt ist, durchaus keine feste Stellung, der Nullpunkt, von welchem aus die Höhe der Barometersäule zu messen ist, steigt und fällt. Des bequemeren Transports wegen sind die Heberbarometer gewöhnlich in einer Hülse von Holz befestigt, Fig. 102, welche geschlossen einen Stab bildet.

Welche Form man auch einem Barometer geben mag, so müssen doch immer gewisse Bedingungen erfüllt seyn, wenn das Instrument genau die Größe des Luftdrucks angeben soll. Zunächst muß die Höhe der Quecksilbersäule genau gemessen werden können, und das ist nur möglich, wenn das Rohr eine vollkommen vertikale Stellung hat. Die Scala befindet sich entweder auf einem Messingstreifen, welcher in das Brett eingelassen ist, auf welchem das Rohr befestigt wird, oder sie ist auf das Rohr selbst eingeätzt.

Fig. 102.



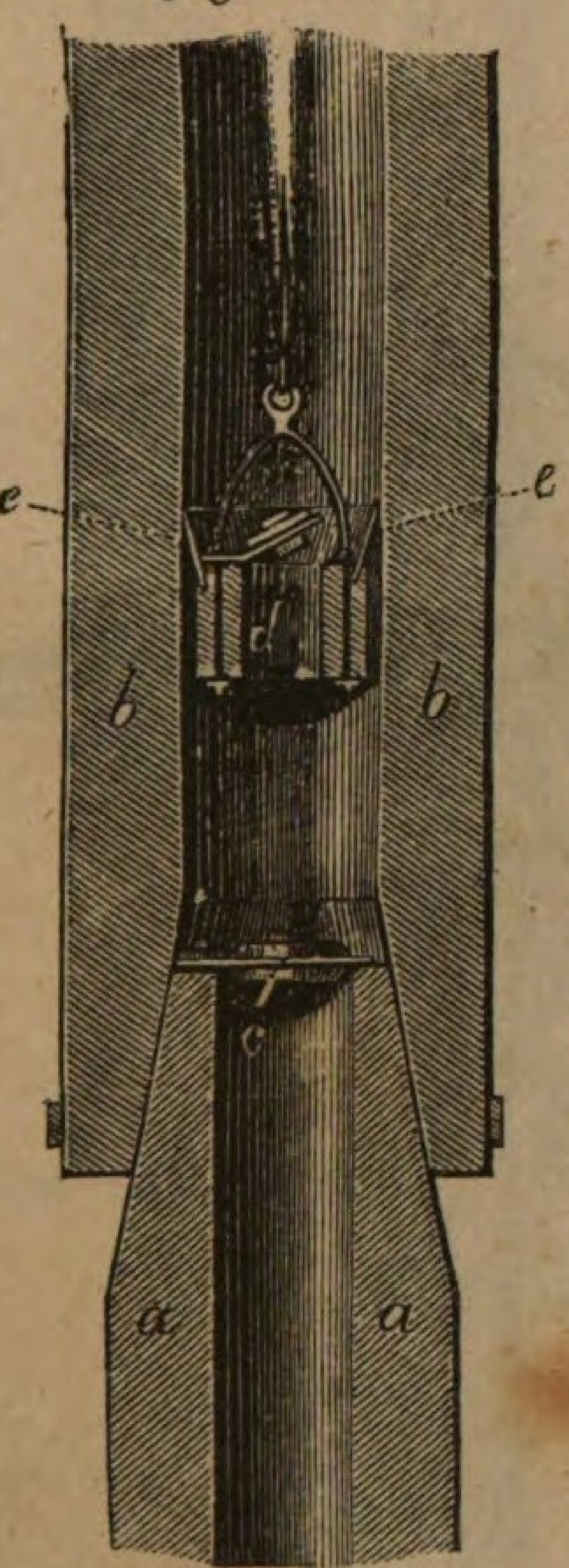
Der Raum über der Quecksilbersäule muß vollkommen luftleer seyn; dies ist nur dadurch zu erreichen, daß man das Quecksilber in der Röhre kocht, denn nur dadurch ist es möglich, alle Luft und alle Feuchtigkeit, welche an den Glaswänden anhaften, zu entfernen. Das Auskochen der Barometer ist eine Operation, welche viel Uebung und Geschicklichkeit erfordert. Wenn in der Toricelli'schen Leere noch etwas Luft zurückgeblieben ist, so erkennt man dies daran, daß sich beim Neigen des Rohrs dasselbe nicht vollständig mit Quecksilber füllt, sondern daß ein kleines Luftbläschen am Gipfel der Röhre zurückbleibt. Der Fehler, der daraus entsteht, ist um so geringer, je größer das Volumen der leeren Kammer ist.

Endlich muß das Quecksilber vollkommen rein und der Durchmesser der Röhre nicht zu klein seyn. Wenn die Röhre zu eng ist, so übt die Adhäsion und die Reibung des Quecksilbers an den Glaswänden einen so bedeutenden Einfluß aus, daß die Quecksilberkuppe oft in einer Höhe stehen bleibt, welche bald höher, bald tiefer ist, als es der Höhe des Luftdrucks nach seyn sollte. Wenn man in einem solchen Fall das Barometer etwas anstößt, so sieht man die Quecksilbersäule augenblicklich etwas steigen oder fallen, je nachdem der vorherige Stand zu tief oder zu hoch war, weil durch den Anstoß das Hinderniß der Bewegung überwunden wird.

Von den Schwankungen des Barometers, welche von der Witterung abhängen, kann erst weiter unten die Rede seyn.

Pumpen. Aus dem Druck der Luft erklären sich eine Menge von Er- 51
scheinungen, welche man täglich zu beobachten Gelegenheit hat. Wenn man am oberen Ende eines in Wasser getauchten Rohres mit dem Munde saugt, so steigt das Wasser im Inneren des Rohres in die Höhe, weil durch das Saugen im oberen Theile ein luftverdünnter Raum entsteht, so daß also der auf den äußeren Wasserspiegel wirkende Luftdruck das Wasser in das Rohr hineindrückt. Man kann das Steigen des Wassers auch dadurch bewirken, daß man im Inneren des Rohres einen Kolben anbringt, durch dessen Aufziehen ebenfalls ein luftverdünnter Raum entsteht. Darauf gründet sich die Einrichtung der Pumpen.

Fig. 103.



Die gewöhnliche Saugpumpe, Figur 103, besteht aus dem Saugrohre *a* und dem Stiefel oder Kolbenrohre *b*. Auf der Oeffnung des Saugrohres liegt ein Ventil, hier eine Klappe, welches durch einen Druck von unten geöffnet, durch einen Druck von oben geschlossen und wasserdicht auf den Rand der Röhre aufgedrückt wird.

Im Kolbenrohre bewegt sich der hohle Kolben *d* mit einem Lederrande *e* und einem Ventile *f*, welches gleichfalls durch einen Druck von unten geöffnet, von oben geschlossen wird. Beim Aufziehen des Kolbens entsteht nun unter demselben ein verdünnter Raum, *f* schließt sich, während das Wasser aus dem Behälter, in welches das Saugrohr eingesenkt ist, durch den Druck der äußeren Luft in diesem Rohre hinaufgetrieben wird und durch das geöffnete Ventil in das Kolbenrohr eintritt. Beim Niedergang des Kolbens schließt sich *c*, so daß dem aufgesaugten Wasser der Rückgang versperrt ist und es nun durch das Ventil *f* über den Kolben tritt.

Beim abermaligen Aufziehen des Kolbens wird eine neue Quantität Wasser aufgesaugt und die über dem Kolben befindliche höher gehoben, um durch ein seitliches Rohr abzufließen.

Bei vollkommen luftdichtem Schluß des Kolbens und der Ventile würde man bei mittlerem Luftdruck das Wasser nahe bis zu 32 Fuß aufsaugen können; bei der geringen Vollkommenheit jedoch, mit welcher solche Pumpen ausgeführt sind, darf das Saugventil *e* nicht wohl mehr als 20 Fuß über dem Wasserspiegel im Bassin angebracht seyn.

Eine etwas anders construirte Saugpumpe sieht man Fig. 104, a. f. S. abgebildet.

Diese Figur bedarf wohl keiner weiteren Erläuterung.

Um das Wasser auf größere Höhen zu heben, in Dampfkessel hineinzupressen u. s. w., werden Druckpumpen angewandt, welche sich von den vorigen dadurch unterscheiden, daß der Kolben massiv ist und daß das aufgesaugte Wasser durch ein seitliches Rohr in die Höhe gedrückt wird, dessen unteres Ende durch ein nach oben sich öffnendes Ventil geschlossen wird. Fig. 105 stellt eine Druckpumpe dar, *h* ist das Saugrohr, *r* das Kolbenrohr, *s* das Steigrohr.

Der Kolben *K* geht luftdicht durch die Stopfbüchse, welche das obere Ende

Fig. 104.

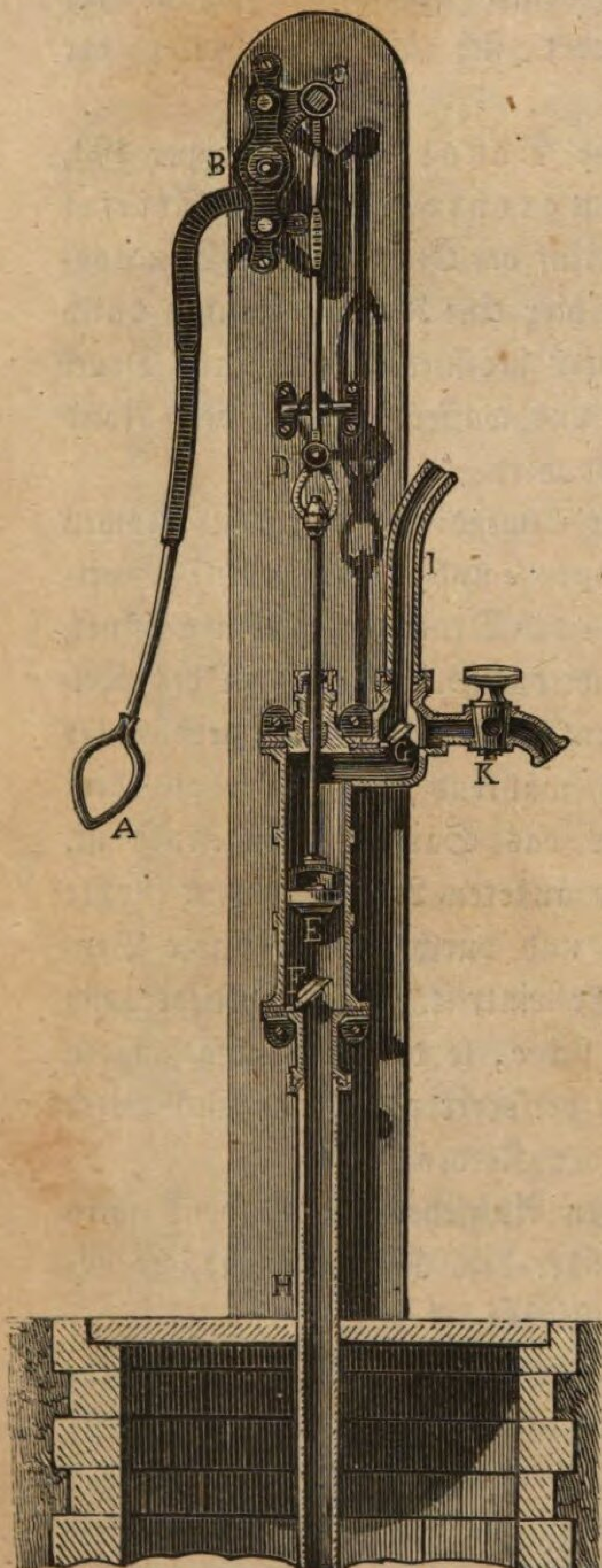
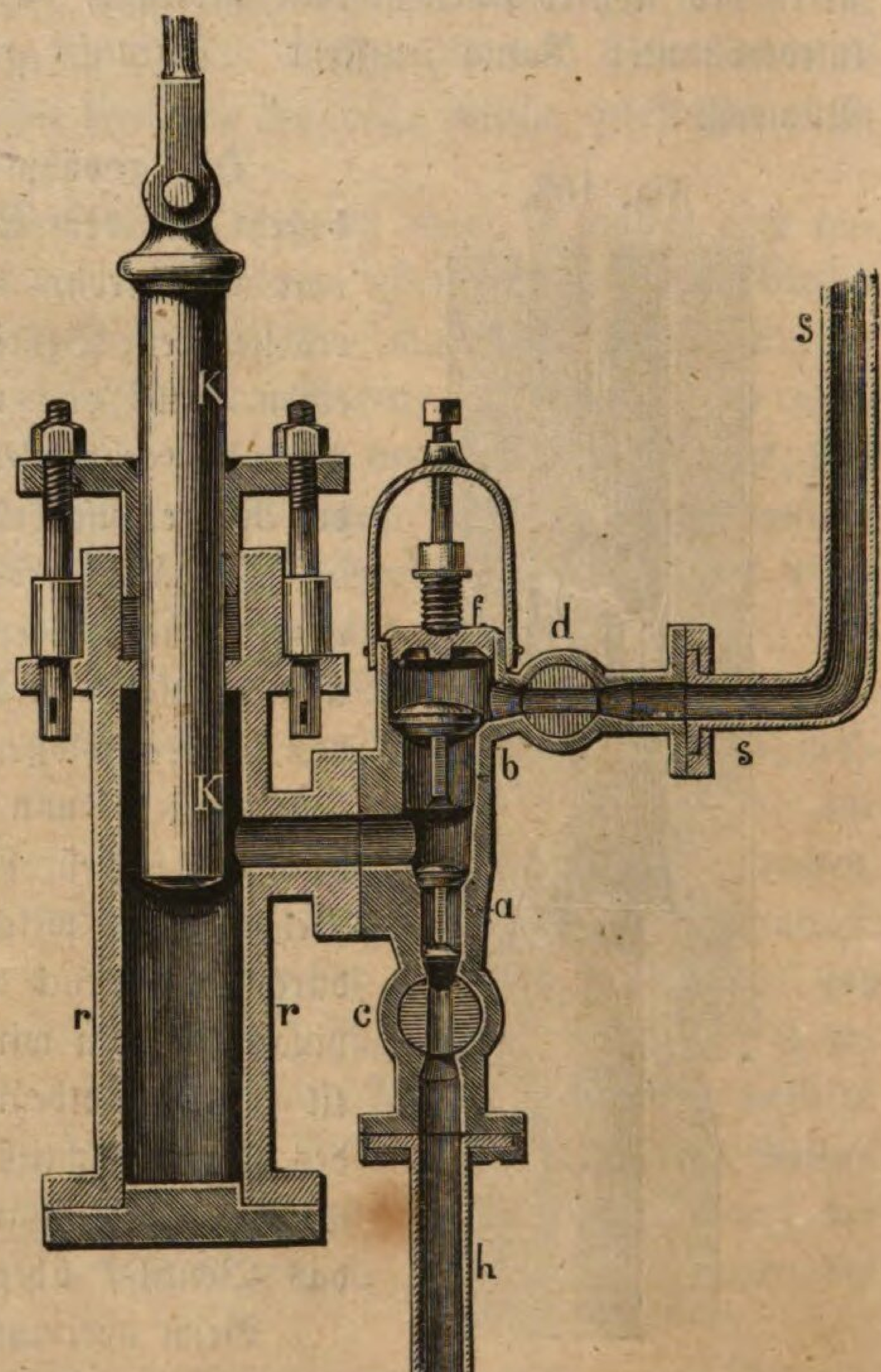


Fig. 105.



des Kolbenrohres schließt. Beim Aufgang des Kolbens hebt sich das Saugventil *a*, um Wasser aus dem Saugrohr durchzulassen, während das Druckventil *b* geschlossen bleibt; beim Niedergang des Kolbens schließt sich *a*, und das vorher aufgesaugte Wasser wird nun durch das geöffnete Ventil *b* in das Steigrohr gepreßt.

Bei *d* und *c* sind Hähne angebracht, die man abstellen kann, wenn die Pumpe nicht mehr arbeiten soll.

Der Deckel *f* kann entfernt werden, wenn man die Ventile nachsehen will. Er ist durch eine starke Drahtfeder aufgedrückt, so daß er gehoben wird, wenn der Druck zu stark werden sollte, wie es z. B. erfolgen kann, wenn das Steigrohr sich verstopft hat oder der Hahn *d* geschlossen bleibt, während *c* offen ist und die Ventile spielen. Der Deckel *f* dient also in diesem Falle als Sicherheitsventil, indem durch sein Heben das Bersten der Röhrenwände verhindert wird.

Der Heber. Wenn man ein Trinkglas, dessen Rand recht gleichförmig 52
ist (am besten ein geschliffenes Glas), ganz mit Wasser füllt, ein Papier darauf deckt und dann das Glas umkehrt, so läuft das Wasser nicht aus; der gegen die untere Fläche des Papiers wirkende Luftdruck hindert das Herabfallen der Wassermasse. Das Papier ist nur deshalb nöthig, um das Glas umkehren zu können und um zu verhindern, daß das Wasser an den Seiten ausläuft und statt dessen Luftblasen in das Gefäß eindringen. Wenn die untere Oeffnung klein genug ist, um ein solches Auslaufen nicht befürchten zu müssen, wie dies beim Stechheber der Fall ist, so ist das Papier nicht mehr nöthig. Der Stechheber ist ein gewöhnlich röhrenförmiges Gefäß, Fig. 106 und Fig. 107, welches oben und unten etwas enger und an beiden Enden offen ist. Taucht man es, wenn beide Oeffnungen frei sind, ganz in eine Flüssigkeit, so füllt es sich mit derselben, und wenn man nun die obere Oeffnung mit dem Daumen verschließt, so kann man den Stechheber in die Höhe ziehen, ohne daß die in demselben enthaltene Flüssigkeit ausläuft.

Fig. 106.

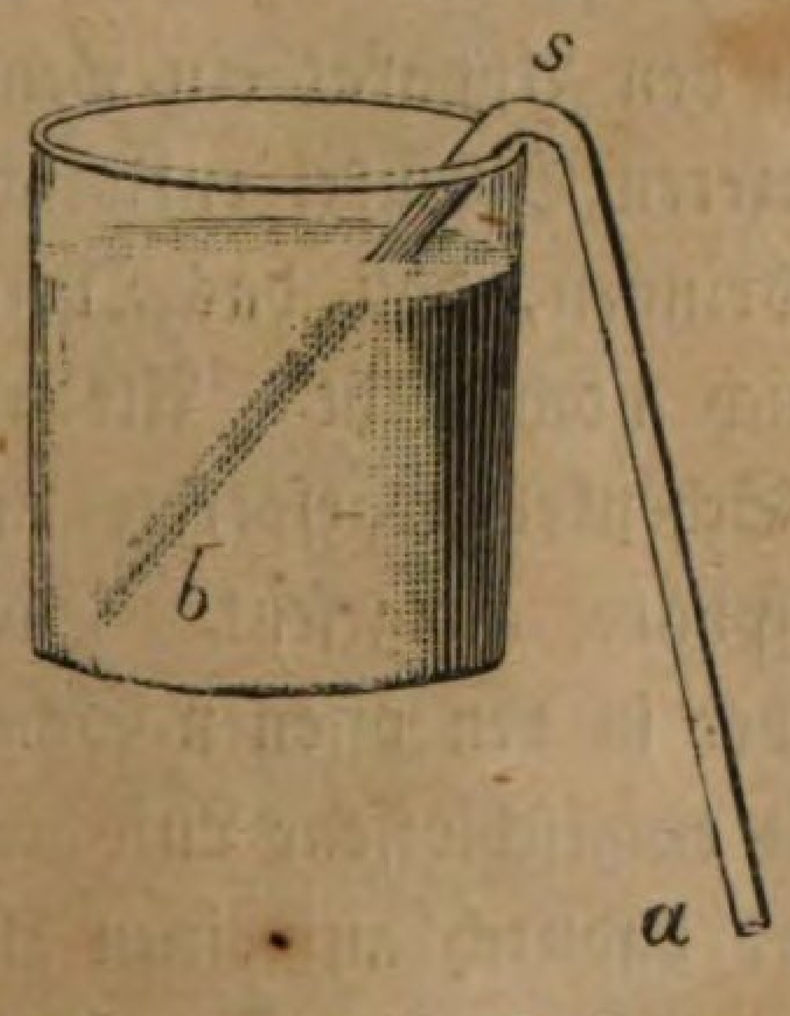


Fig. 107.



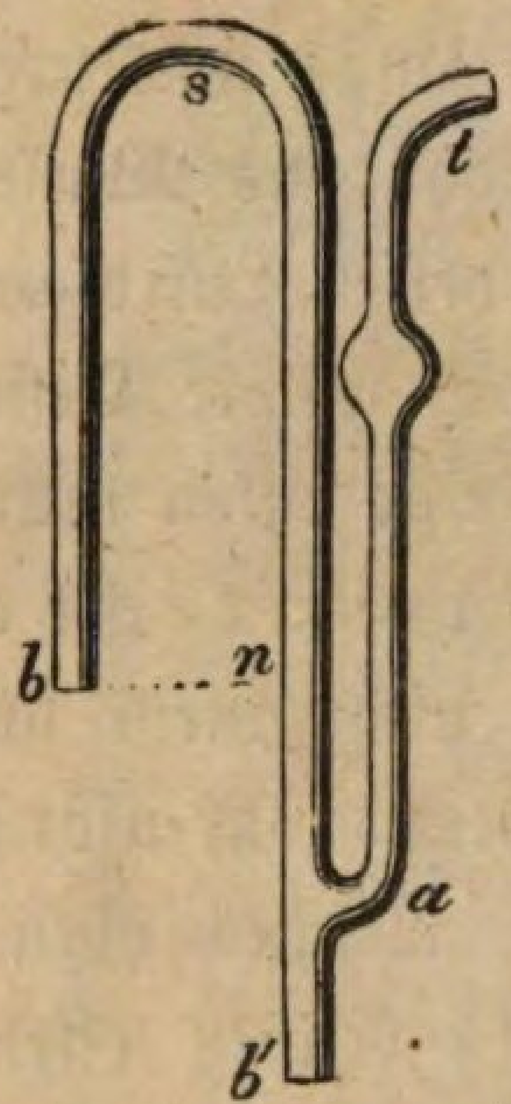
Der Heber ist eine gekrümmte Röhre *bsa*, deren Schenkel ungleiche Länge haben. Wenn der kürzere Schenkel in eine Flüssigkeit eingetaucht und die ganze Röhre mit derselben gefüllt ist, so läuft sie am Ende *a* des längeren Schenkels, welches tiefer liegt als *b*, fortwährend aus, man kann also mit Hülfe eines Hebers leicht ein Gefäß entleeren. Die Wirkung des Hebers ist leicht zu erklären. Auf der einen Seite hat die Wassersäule *sa*, auf der anderen die Wassersäule *s* bis zum Spiegel der Flüssigkeit im Gefäß ein Bestreben, vermöge ihrer Schwere herabzufallen; der Schwere der in beiden Schenkeln befindlichen Wassersäulen wirkt aber auf beiden Seiten der Luftdruck entgegen, welcher auf der einen Seite gegen die Oeffnung *a*, auf der anderen aber auf den Spiegel des Wassers im Gefäß wirkt und dadurch die Bildung eines leeren Raumes im Inneren der Röhre verhindert, welcher sich nothwendiger Weise bei *s* bilden würde, wenn die Wassersäulen auf beiden Seiten herabliefen. Da der Luftdruck auf der einen

Fig. 108.



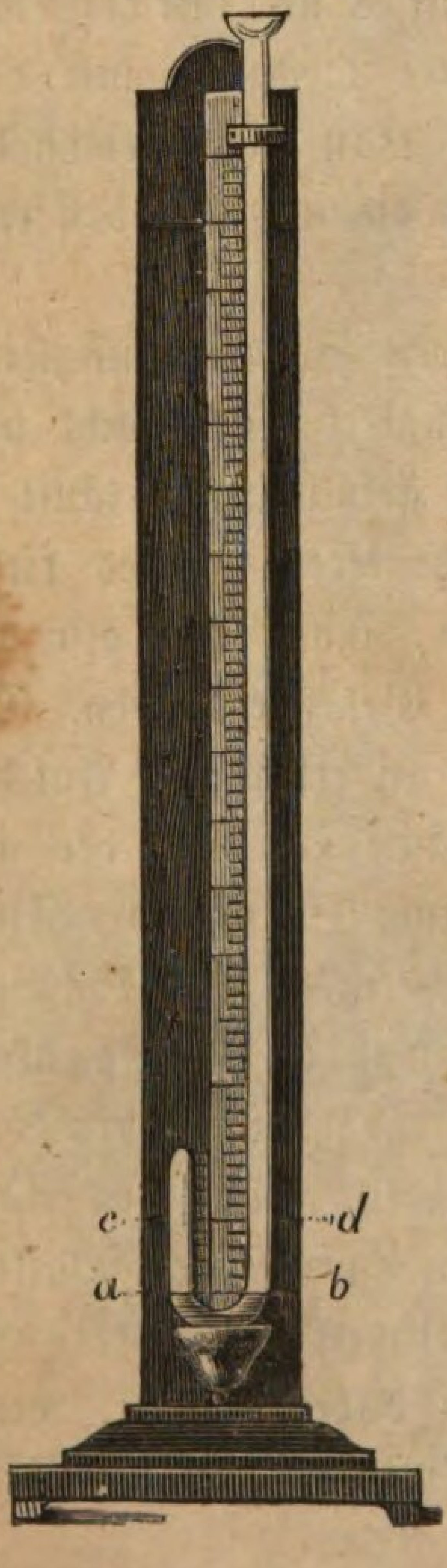
Seite so stark wirkt wie auf der anderen, so würde vollkommenes Gleichgewicht stattfinden, wenn die Wassersäulen in den beiden Schenkeln gleich hoch wären, wenn sich also die Oeffnung *a* in der Höhe des Wasserspiegels im Gefäße befände; sobald aber *a* tiefer liegt, erhält die Wassersäule im Schenkel *s a* das Uebergewicht, und in dem Maaße, als hier das Wasser ausläuft, wird auf der anderen Seite durch den Luftdruck von Neuem Wasser in die Röhre hineingetrieben, so daß das Ausfließen bei *a* fortdauert, bis der Spiegel der Flüssigkeit im Gefäß auf die Höhe der Oeffnung *a* gefallen oder die Oeffnung bei *b* frei geworden ist.

Fig. 109.



Um den Heber bequem füllen und in Wirksamkeit setzen zu können, wird eine Saugröhre *a t*, Fig. 109, angebracht. Einen gewöhnlichen Heber füllt man nämlich dadurch, daß man bei *a* Fig. 108 saugt; dabei ist aber nicht zu vermeiden, daß man etwas von der Flüssigkeit in den Mund bekommt, was in manchen Fällen unangenehm, oft sogar gefährlich seyn kann, wie z. B. wenn man den Heber anwenden will, um ein Gefäß mit Schwefelsäure zu entleeren; in einem solchen Falle ist das Saugrohr unentbehrlich, denn wenn man die Röhre bei *b'* Fig. 109 verschließt, so kann man durch Saugen bei *t* den ganzen Schenkel *s b'* füllen, ohne daß die Flüssigkeit an den Mund kommt. Das Auslaufen beginnt alsdann, sobald man das Röhrenende *b'* wieder öffnet.

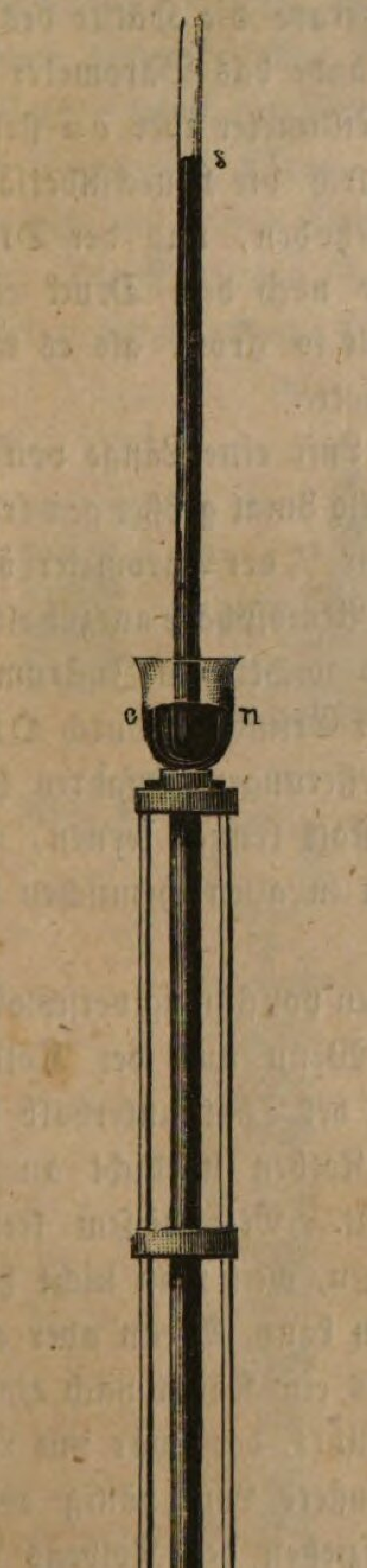
Fig. 110.



53 **Das Mariotte'sche Gesetz.** Das Volumen der Gase verhält sich umgekehrt wie der Druck, dem sie ausgesetzt sind. Um dieses Fundamentalgesetz durch den Versuch zu beweisen, nehme man eine gekrümmte cylindrische Röhre, deren kürzerer Schenkel oben geschlossen ist, während der längere Schenkel offen bleibt. Man gieße zu Anfang nur wenig Quecksilber ein, neige dann den Apparat ein wenig, damit etwas Luft aus dem kürzeren Schenkel entweicht; so kann man es leicht dahin bringen, daß das Quecksilber in beiden Schenkeln gleich hoch steht. Alsdann ist die in dem geschlossenen Schenkel abgesperrte Luft genau dem Druck der Atmosphäre ausgesetzt. Gießt man nun von Neuem Quecksilber in den offenen Schenkel, so wird der Druck, den die eingeschlossene Luft auszuhalten hat, vermehrt, sie wird dadurch auf einen kleineren Raum zusammengepreßt. Wenn das Quecksilber im kürzeren Schenkel bis zum Punkte *c* gestiegen ist, welcher sich in der Mitte zwischen *a* und dem Gipfel der geschlossenen Röhre befindet, so ist die Luft auf die

Hälfte ihres vorherigen Volumens zusammengepreßt; bezeichnet man nun auf dem längeren Schenkel den Punkt *d*, welcher mit *c* gleiche Höhe hat, und mißt man dann, wie hoch das Quecksilber sich im längeren Schenkel noch über *d* erhebt, so findet man, daß die Höhe dieser Quecksilbersäule genau der Barometerhöhe gleich ist; die im kurzen Rohre eingeschlossene Luft hat demnach einen Druck von 2 Atmosphären auszuhalten. Wenn der offene Schenkel dieses Apparats lang genug ist, so kann man auf dieselbe Weise zeigen, daß ein Druck von 3, 4 Atmosphären die eingeschlossene Luft auf $1/3$, $1/4$ ihres ursprünglichen Volumens zusammenpreßt. Arago und Dulong haben bewiesen, daß dieses Gesetz für atmosphärische Luft wenigstens bis zu einem Drucke von 27 Atmosphären noch keine Aenderung erleidet.

Fig. 111.



Durch diese Versuche ist die Richtigkeit des Ma- 54
riotte'schen Gesetzes von einem Druck von 1 Atmosphäre bis zu einem Druck von 27 Atmosphären bewiesen, für einen Druck aber, welcher geringer ist als 1 Atmosphäre, kann man es mit Hülfe des folgenden Apparats bestätigen.

Eine etwas weite Glasröhre, welche oben in ein weiteres Gefäß endigt und unten zugeschmolzen ist, wird in einem Gestelle so angebracht, daß sie vertikal steht. Sie wird etwa bis *cn* mit Quecksilber vollgegossen. Nun füllt man eine Barometerröhre, wie zum Toricelli'schen Versuche (Nr. 49) mit Quecksilber, jedoch nicht ganz voll, sondern nur so weit, daß noch etwa 3 bis 5 Centimeter nicht mit Quecksilber angefüllt sind. Verschließt man die Oeffnung mit dem Finger, kehrt sie dann um, so wird die Luftblase in den oberen Theil der Röhre hinaufsteigen. Wenn man nun, wie beim Toricelli'schen Versuche, das untere Ende der Röhre in das Quecksilber des Gefäßes *cn* taucht und dann den Finger von der Oeffnung wegzieht, so wird die Quecksilbersäule im Barometerrohre bis auf einen bestimmten Punkt fallen. Man wird aber sogleich bemerken, daß der Gipfel der Quecksilbersäule nicht so hoch über *cn* steht als die Barometerhöhe beträgt, weil ja im oberen Theile unserer Röhre sich Luft befindet und kein Vacuum wie beim Barometer.

Wenn man die Röhre niederdrückt, so daß sie weiter und weiter in das Quecksilber des weiten Rohres hinabreicht, so wird das Volumen der oben eingeschlossenen Luft immer kleiner. Man drückt nun die Röhre so weit hinab, daß

das Quecksilber im Rohre genau in der Höhe des Quecksilberspiegels *c n* steht. In diesem Falle steht die abgesperrte Luft genau unter dem Drucke einer Atmosphäre.

Die Höhe der abgesperrten Luftsäule, welche dem Druck von einer Atmosphäre ausgesetzt ist, wird nun gemessen; sie betrage 5 Centimeter.

Zieht man das Rohr wieder in die Höhe, so vermehrt sich das Volumen der abgesperrten Luft, zugleich aber erhebt sich auch die Quecksilberkuppe im Rohr über den Spiegel *cn*. Gesetzt, man habe das Rohr so weit gehoben, daß die abgesperrte Luft eine Länge von 10 Centimetern in der Röhre einnimmt, so wird die Höhe der Quecksilberkuppe über dem Spiegel *cn* gerade die Hälfte des im Augenblick zu beobachtenden Barometerstandes seyn. Stände das Barometer auf 760 Millimeter, so würde die Messingkuppe gerade 380 Millimeter über *cn* stehen.

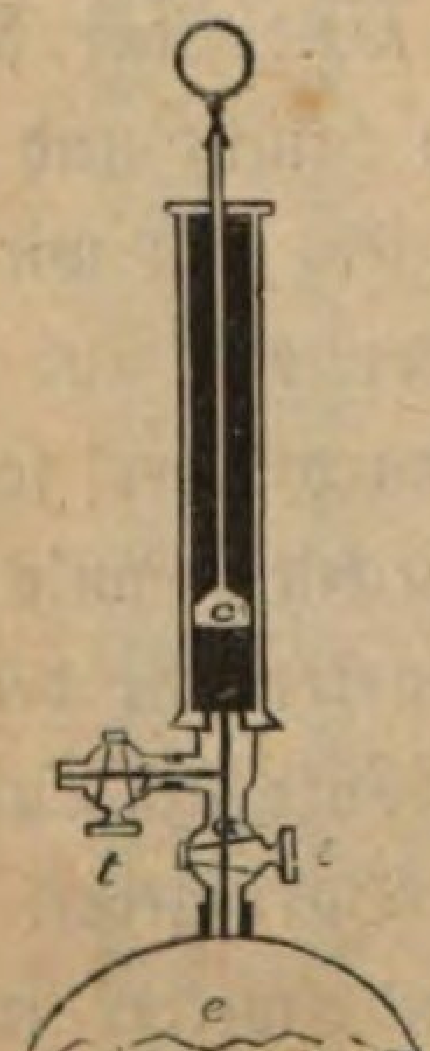
Die Hälfte des atmosphärischen Drucks ist also durch die Quecksilbersäule, welche sich unter der abgesperrten Luft befindet, aufgehoben, und der Druck, welchen diese abgesperrte Luft auszuhalten hat, ist nur noch dem Druck einer halben Atmosphäre gleich, ihr Volumen aber ist doppelt so groß, als es war, da sie den Druck der ganzen Atmosphäre auszuhalten hatte.

Hebt man die Röhre so weit, daß die abgesperrte Luft eine Länge von 15 Centimetern in der Röhre einnimmt, daß ihr Volumen also 3mal größer geworden ist, so beträgt die Höhe der Quecksilbersäule in unserem Rohr $^2/_3$ der Barometerhöhe; die abgesperrte Luft hat also nur noch einen Druck von $^1/_3$ Atmosphäre auszuhalten.

55 **Die Luftpumpe.** Zu den unentbehrlichsten und wichtigsten Instrumenten des Physikers gehört die Luftpumpe, welche seit ihrer Erfindung durch Otto von Guericke mancherlei Veränderungen und Verbesserungen erfahren hat. Wir wollen sie zunächst in einer möglichst einfachen Gestalt kennen lernen, und deshalb die kleinen Luftpumpen betrachten, wie sie jetzt in allen chemischen Laboratorien gebraucht werden.

Denken wir uns einen hohlen Cylinder, welcher unten vollständig verschlossen ist, und auf dessen Boden ein Kolben *c* fest aufsitzt. Wenn nun der Kolben mit Gewalt in die Höhe gezogen wird, so bildet sich in der That unterhalb des Kolbens ein luftleerer Raum, vorausgesetzt, daß der Kolben luftdicht an die Wände des Cylinders anschließt. Mit diesem leeren Raume ist aber nichts anzufangen, weil man nicht hineinsehen und nichts hineinbringen kann. Wenn aber aus dem unteren Theil des Cylinders ein Kanal nach einem Raume, etwa einem Ballon *e* führt, der zwar mit Luft gefüllt, aber doch gegen die äußere Luft völlig abgeschlossen ist, so wird beim Aufziehen des Kolbens ein Theil der Luft aus *e* vermöge ihrer Elasticität in den Cylinder treten, und somit eine Luftverdünnung in *e* entstehen. Damit aber beim Niedergang des Kolbens die Luft nicht wieder in den Raum *e* zurücktreten kann, ist ein Hahn *s* angebracht, mittelst dessen man nach Belieben die Verbindung zwischen *e* und dem Cylinder unterbrechen und wieder herstellen kann. Dieser

Fig. 112.



Hahn *s* wird geschlossen, sobald der Kolben oben angekommen ist. Drückt man nun den Kolben nieder, so wird dabei nur die Luft im Cylinder comprimirt werden, wenn man ihr keinen Ausweg verschafft; diesen erhält man aber dadurch, daß man einen zweiten Hahn *t* öffnet. Wenn der Kolben unten angekommen ist, wird *t* wieder geschlossen, *s* geöffnet, und ein abermaliges Aufziehen des Kolbens bringt eine neue Verdünnung in *e* hervor. Durch öftere Wiederholung dieser Operationen kann man eine bedeutende Verdünnung in *e* hervorbringen.

In der eben angegebenen Form ist aber der Apparat in mancher Beziehung unbequem. Zunächst ist das fortwährende Oeffnen und Schließen von zwei Hähnen äußerst lästig. Der Hahn *t* aber läßt sich dadurch vermeiden, daß man im Kolben selbst ein Ventil anbringt, welches sich beim Aufziehen schließt und beim Niedergang öffnet. Der untere Theil des Kolbens besteht aus einer Messingplatte mit einer Schraube, welche in ein Stück Messing *cc* eingeschraubt wird. Die Schraube ist der Länge nach durchbohrt, und oben wird ein Stück Taffet *r* aufgebunden, Fig. 113, welches die Oeffnung *o* bedeckt. In dem Messingstück, in welches die Schraube eingeschraubt ist, befindet sich eine Oeffnung *b*. Beim Aufziehen des Kolbens drückt die Luft im oberen Theil des Cylinders durch die Oeffnung *b*, Fig. 114, auf das Stück Taffet und preßt es fest auf die Oeffnung *o*; der Kolben wirkt also beim Aufziehen gerade so, als ob er massiv wäre; die Luft tritt also aus dem Raum *e* durch den geöffneten Hahn *s* in den unteren Theil des Cylinders; wenn aber, nachdem der Hahn *s* geschlossen ist, der Kolben wieder niedergedrückt wird, so wird die Luft im unteren Theil des Cylinders comprimirt, sie hebt das Ventil *r* und entweicht durch die Oeffnung *b* in den oberen Theil des Cylinders.

Fig. 113.



Fig. 114.

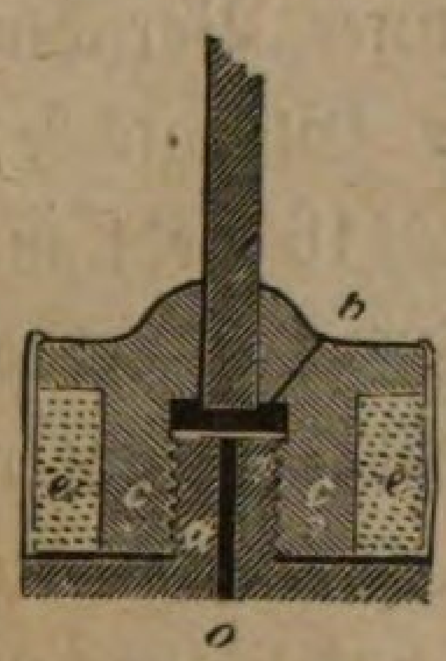


Fig. 115.



Das Messingstück *c* steckt in einem Korke, welcher rund herum mit einem feinen Leder umgeben ist. Dieses Leder wird durch die Elasticität des Korkes an die Wände des Cylinders angepreßt.

Der Hahn *s* wird ebenfalls entbehrlich, wenn ein zweites Ventil da angebracht ist, wo der nach dem Cylinder führende Kanal in den Cylinder mündet. Dieses Ventil öffnet sich beim Aufziehen des Kolbens und schließt sich beim Niedergang.

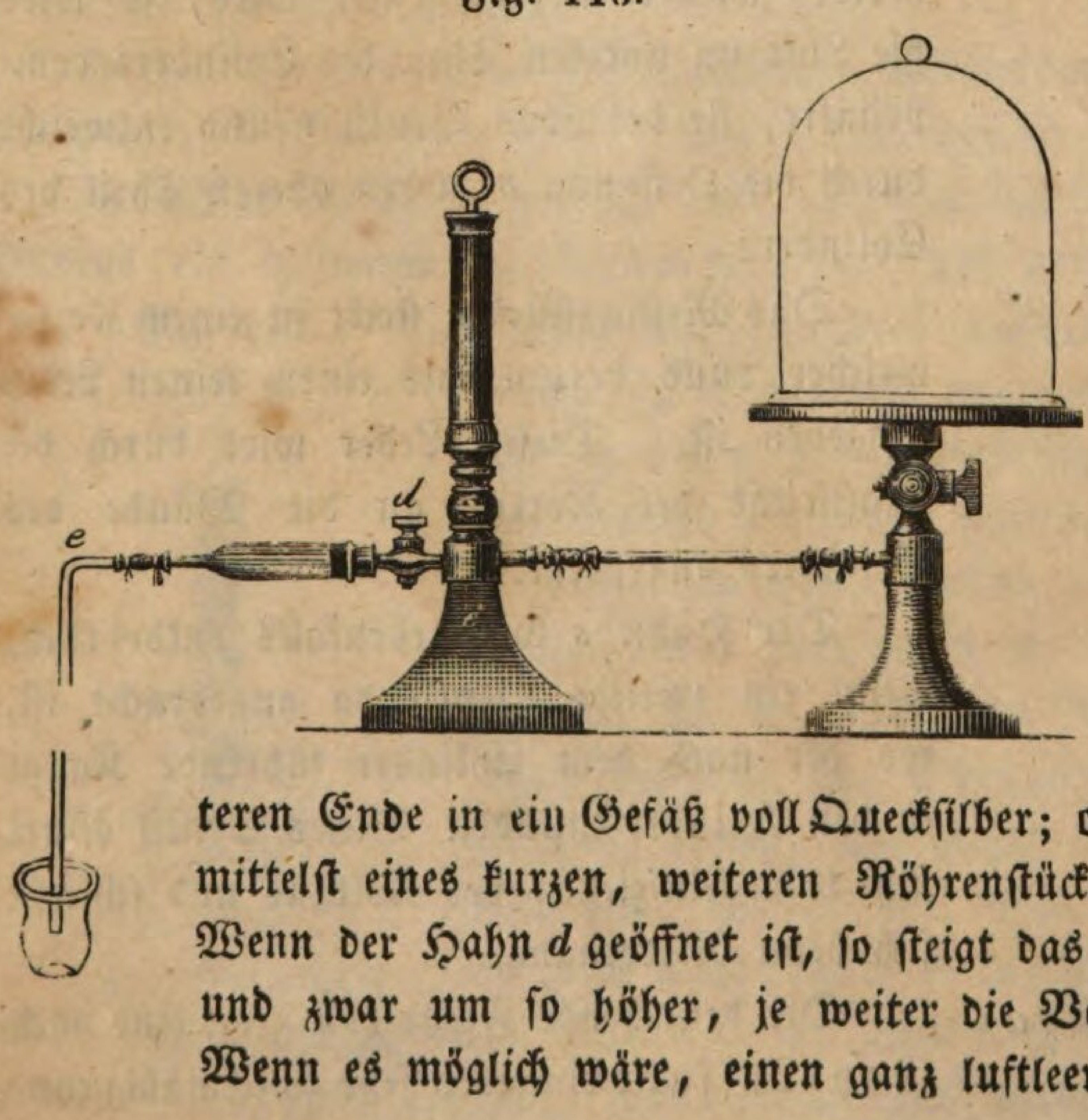
Die beistehende Figur 115 zeigt eine nach Gay-Lussac's Angaben sehr zweckmäßig con-

struirte kleine Handluftpumpe in $\frac{1}{3}$ der natürlichen Größe. Vom unteren Ende des Cylinders geht der Kanal vertikal herunter, bis auf einen horizontal laufenden Kanal *ab*. Der Hahn bei *d* sey geschlossen, bei *a* aber der Recipient angeschraubt, welcher luftleer gemacht werden soll, so wird beim Aufziehen des Kolbens ein Theil der Luft durch den erst wagerecht, dann vertikal gerichteten Kanal in den Cylinder treten und beim Niederdrücken des Kolbens durch das Kolbenventil entweichen. Wenn man die Luft wieder in den Recipienten hineinlassen will, so hat man nur den Hahn bei *d* zu öffnen.

Vermittelst der Schraube *f* wird die Luftpumpe auf einen Tisch oder auf ein an dem Tische befestigtes Brett angeschraubt, damit sie während des Gebrauchs gehörig feststeht.

Mit dem Namen des **Recipienten** bezeichnet man den Raum, welcher luftleer gemacht werden soll. Für die meisten Versuche mit der Luftpumpe ist die geeignetste Form des Recipienten eine Glasglocke, deren unterer etwas breiter Rand eben abgeschliffen seyn muß, damit sie auf den ebenfalls ganz eben abgeschliffenen Teller so aufpaßt, daß zwischen den Teller und die Glasglocke keine Luft eindringen kann. Ein vollkommner Verschluß ist jedoch nur dadurch hervorzubringen, daß man den Rand der Glasglocke, bevor man sie auf den Teller setzt, mit Talg beschmiert. In Fig. 116 sieht man, wie ein solcher Recipient mit der kleinen Luftpumpe in Verbindung gebracht wird. Von der Mitte des Tellers geht nämlich ein Kanal vertikal herunter und läuft dann durch eine kurze horizontale Röhre weiter. An das Ende dieses kurzen horizontalen Röhrenstücks wird mit Hülfe eines Kautschuk-Röhrchens ein Glasrohr angesetzt, welches auf der anderen Seite ebenfalls durch eine Kautschuk-Röhre an die Luftpumpe befestigt ist.

Fig. 116.



Den Grad der Luftverdünnung, welchen man durch Auspumpen hervorgebracht hat, kann man durch eine sogenannte Barometerprobe messen. Für die kleinen Handluftpumpen ist die Barometerprobe so eingerichtet, wie die Fig. 116 zeigt. Eine etwa 30 Zoll lange Glasröhre *e* taucht mit ihrem unteren Ende in ein Gefäß voll Quecksilber; oben ist sie umgebogen und mittelst eines kurzen, weiteren Röhrenstücks an die Pumpe befestigt. Wenn der Hahn *d* geöffnet ist, so steigt das Quecksilber in die Röhre, und zwar um so höher, je weiter die Verdünnung getrieben wird. Wenn es möglich wäre, einen ganz luftleeren Raum durch die Luft-

pumpe zu erzeugen, so würde die im Rohre *e* gehobene Quecksilbersäule der Barometerhöhe gleich seyn.

Gewöhnlich bedient man sich, um den durch die Luftpumpe hervorgebrachten Grad der Verdünnung zu messen, des abgekürzten Barometers als Barometerprobe. Fig. 117 stellt ein abgekürztes Barometer in $\frac{1}{3}$ der natürlichen Größe dar. Das Quecksilber füllt den zugeschmolzenen Schenkel bei gewöhnlichem Luftdruck ganz aus. Wird nun dieser Apparat aufrechtstehend unter die Glocke der Luftpumpe gebracht, so beginnt das Quecksilber im geschlossenen Schenkel zu sinken, wenn der auf den offenen Schenkel wirkende Luftdruck auf $\frac{1}{4}$ Atmosphärendruck reducirt ist. Geht nun die Verdünnung der Luft im Recipienten weiter, so giebt die Höhendifferenz der Quecksilberkuppen in beiden Röhren die Größe des Druckes an, welchen die unter der Glocke noch zurückgebliebene Luft ausübt.

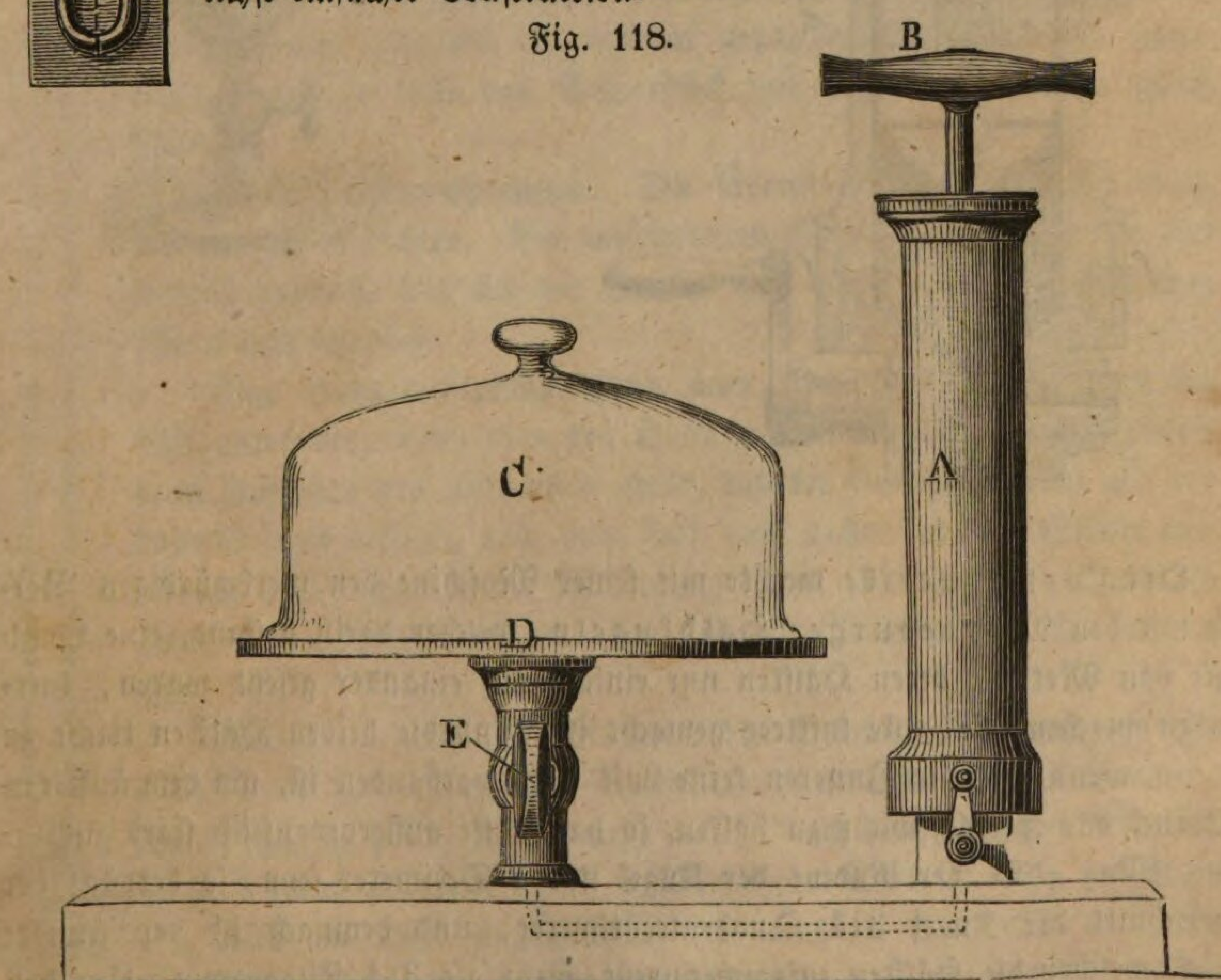
Fig. 117.



Anstatt aber diese Barometerprobe unter die Glocke der Luftpumpe zu stellen, ist sie gewöhnlich in einem besonderen kleinen, durch eine enge Glasglocke gebildeten Recipienten angebracht, welcher gleichfalls mit dem zum Stiefel führenden Kanal communicirt und durch einen besondern Hahn abgestellt werden kann.

Statt der Ventile werden häufig Hähne bei den Luftpumpen angewandt. Fig. 118 zeigt eine Hahnenluftpumpe von möglichst einfacher Construction.

Fig. 118.



Der Hahn g, welcher am unteren Ende des Cylinders sich befindet, ist doppelt durchbohrt; ein Kanal geht rechtwinklig zur Umdrehungsaxe gerade durch. Er erscheint in Fig. 119 verkürzt und ist mit h bezeichnet; der andere Kanal, welcher in unserer Figur seiner ganzen Länge nach sichtbar ist, tritt seitwärts in die Masse des Metallkegels ein und krümmt sich dann, um in der Richtung der Umdrehungsaxe des Hahns auszutreten.

Wenn der Kolben niedergeht, so hat der Hahn die Stellung Fig. 119, die Luft unter dem Kolben wird also durch den gebogenen Kanal des Hahns ausgetrieben. Wenn der Kolben unten angekommen ist, wird der Hahn um eine Viertelumdrehung gedreht, so daß nun der Kanal h den unteren Theil des Cylinders mit dem Kanal l verbindet, der zum Recipienten führt; beim Aufgang des Kolbens wird also Luft aus dem Recipienten gesaugt, die nachher beim Niedergang des Kolbens seitwärts durch den Hahn fortgeschafft wird.

Im Uebrigen sind die beiden Figuren wohl ohne nähere Erklärung verständlich.

Fig. 119.

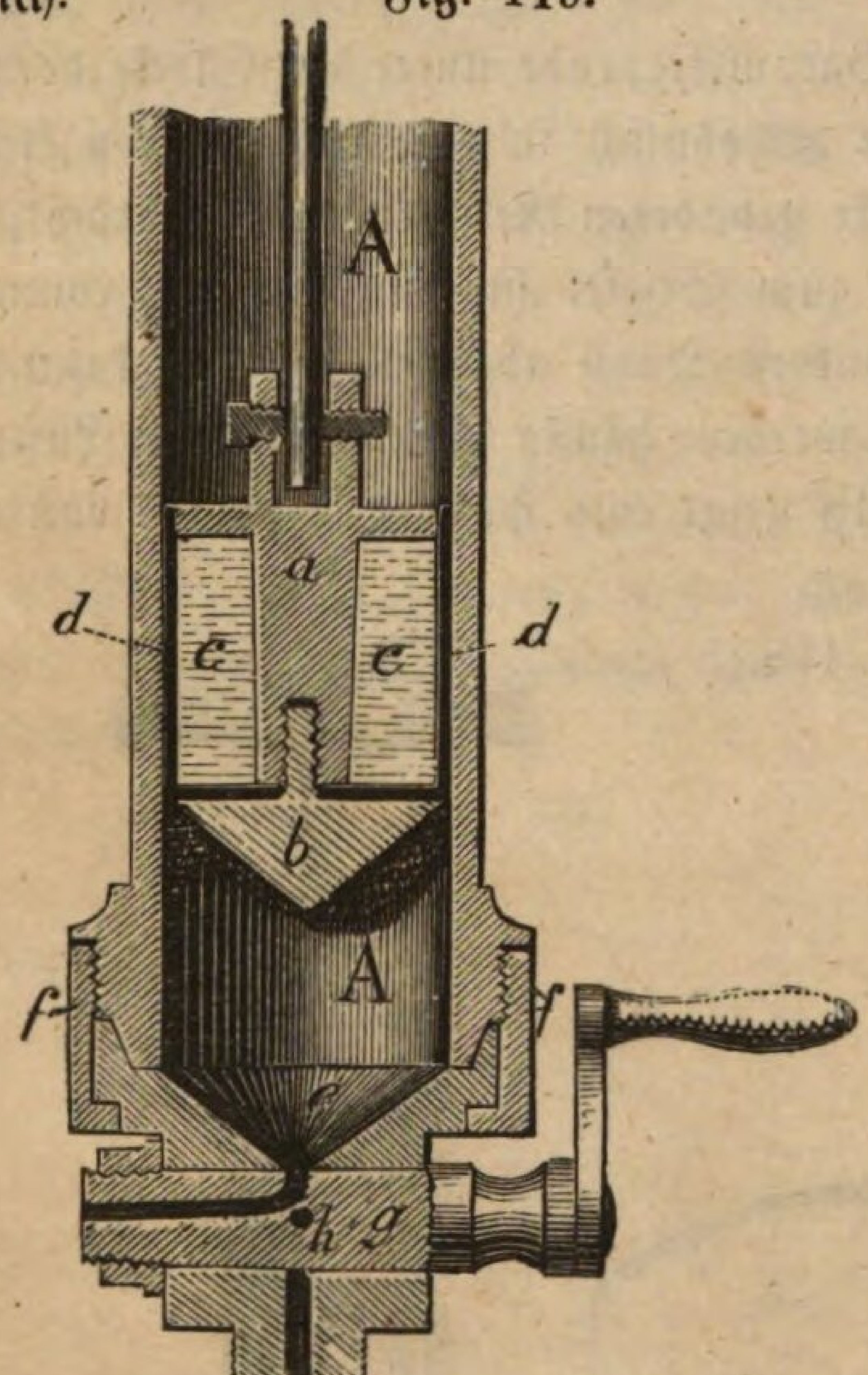


Fig. 120.



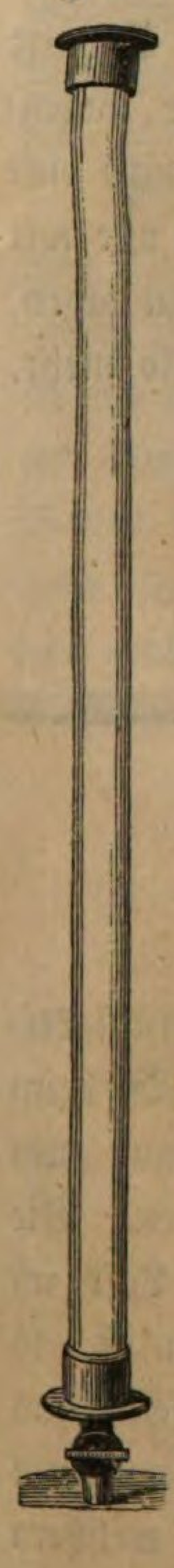
Otto von Guerike machte mit seiner Maschine den merkwürdigen Versuch mit den Magdeburger Halbkugeln, welcher darin bestand, eine Hohlkugel von Metall, deren Hälften nur einfach auf einander gesetzt waren, luftleer zu machen. Ehe sie luftleer gemacht ist, sind die beiden Hälften leicht zu trennen, wenn aber im Inneren keine Luft mehr vorhanden ist, um dem äußeren Luftdruck das Gleichgewicht zu halten, so halten sie außerordentlich stark zusammen. Mag z. B. der Radius der Kugel nur 1 Decimeter seyn, so beträgt der Querschnitt der Kugel 314 Quadratcentimeter, und demnach ist der äußere Druck, welcher die Hälften zusammenpreßt, mehr als 314 Kilogramm. Um den

Contact vollständiger zu machen, werden die Ränder der Halbkugeln, welche auf einander gesetzt werden, mit Fett beschmiert, wie eine Glocke, bevor man sie auf den Teller setzt; ein Hahn *c*, welcher während des Auspumpens geöffnet ist, wird, bevor man die zusammengedrückten Halbkugeln von der Luftpumpe abschraubt, geschlossen, um den Wiedereintritt der Luft zu verhindern.

Man gebraucht die Luftpumpe zu mancherlei Versuchen. Man zeigt z. B., daß brennende Körper im luftleeren Raume verlöschen; daß der Rauch wie ein schwerer Körper zu Boden fällt; daß Luft im Wasser gleichsam aufgelös't ist; daß sich eine Luftschicht zwischen den Flüssigkeiten und den Wänden der Gefäße befindet, in welchen sie enthalten sind, denn diese Luftschicht zeigt sich durch eine Menge kleiner Bläschen, welche in dem Verhältniß wachsen, als der Luftdruck abnimmt. Mit Hülfe der Luftpumpe kann man kaltes Wasser zum Kochen bringen u. s. w.

Wenn wir sehen, daß eine Feder langsamer zur Erde fällt als ein Stein, so ist die Ursache dieses Unterschiedes nur in dem Widerstande der Luft zu suchen; im luftleeren Raume fallen beide gleich schnell. Man kann dies mittelst der Luftpumpe auf folgende Weise zeigen.

Fig. 121.



Eine Glasröhre von ungefähr 1 Zoll Durchmesser und 6 Fuß Länge ist oben und unten mit einer Messingfassung luftdicht zugekittet, wie man Fig. 121 sieht. Die untere Fassung enthält einen Hahn und kann auf die Luftpumpe aufgeschraubt werden. In der Röhre befindet sich ein etwas großes Schrotkorn und eine Papierscheibe von ungefähr 4 Linien Durchmesser. Wenn nun die Röhre, nachdem sie luftleer gemacht worden ist, vertikal gehalten und dann rasch umgekehrt wird, so fällt das Papierstück und das Bleikügelchen gleich schnell.

Compressionspumpe. Die Compressionspumpe dient dazu, die Luft zu verdichten. Sie unterscheidet sich von der Luftpumpe wesentlich dadurch, daß sich die Ventile nach entgegengesetzter Richtung öffnen und schließen.

Eine Hahnenluftpumpe kann man auch zum Comprimiren der Luft anwenden, wenn man den Hahn am unteren Ende des Stiefels beim Aufgehen des Kolbens so stellt, daß die Communication mit der äußeren Luft besteht, daß also Luft von außen in den Stiefel eindringt; dann aber beim Niedergange des Kolbens den Hahn so stellt, daß Stiefel und der angeschraubte Recipient in Verbindung sind.

Eine der bekanntesten Formen der Compressionspumpe ist die, welche man zum Laden der Windbüchse anwendet. Der Kolben der Windbüchse ist hohl; ein Ventil, welches sich nach innen öffnet, läßt die Luft zwar eintreten, hindert aber ihren Austritt. An den Kolben wird ein Rohr angeschraubt, wie man in Fig. 122, a. f. S., sieht, in welchem ein Kolben luftdicht auf- und abgeschoben werden

kann. Wenn sich der Kolben am unteren Ende des Laderohres befindet, so kann Luft durch zwei seitliche Löcher eintreten; diese Luft wird nun beim Hinauf-

Fig. 122.

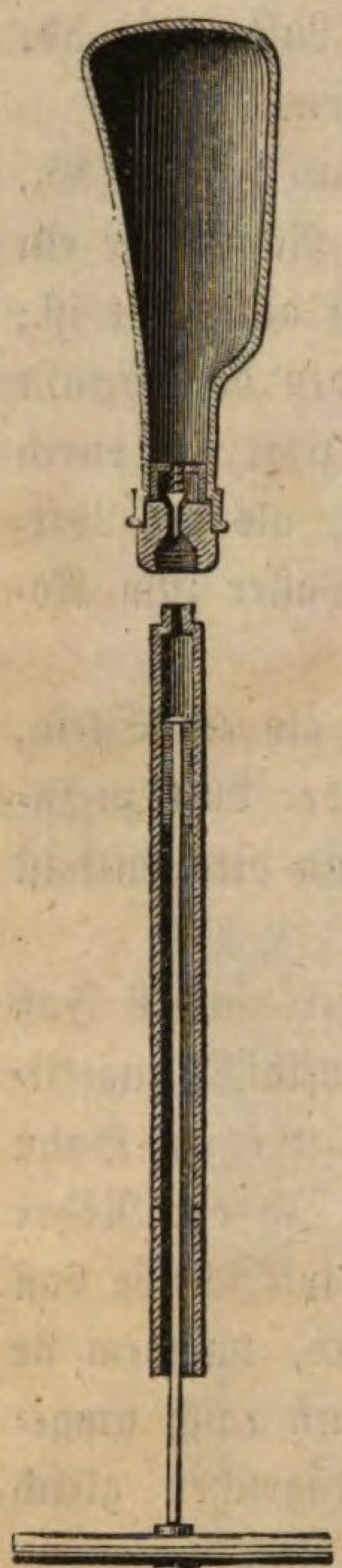
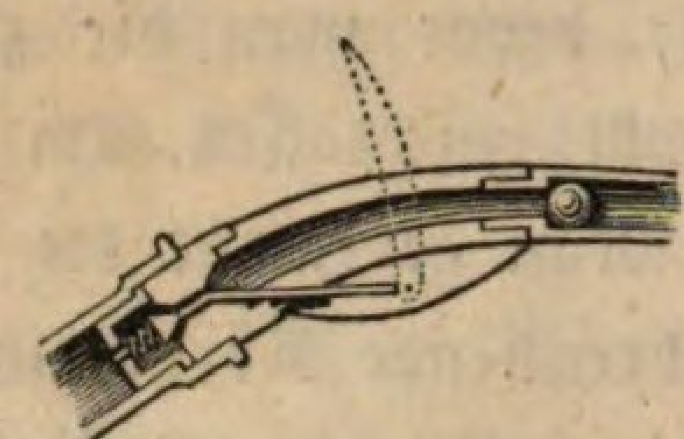


Fig. 123.



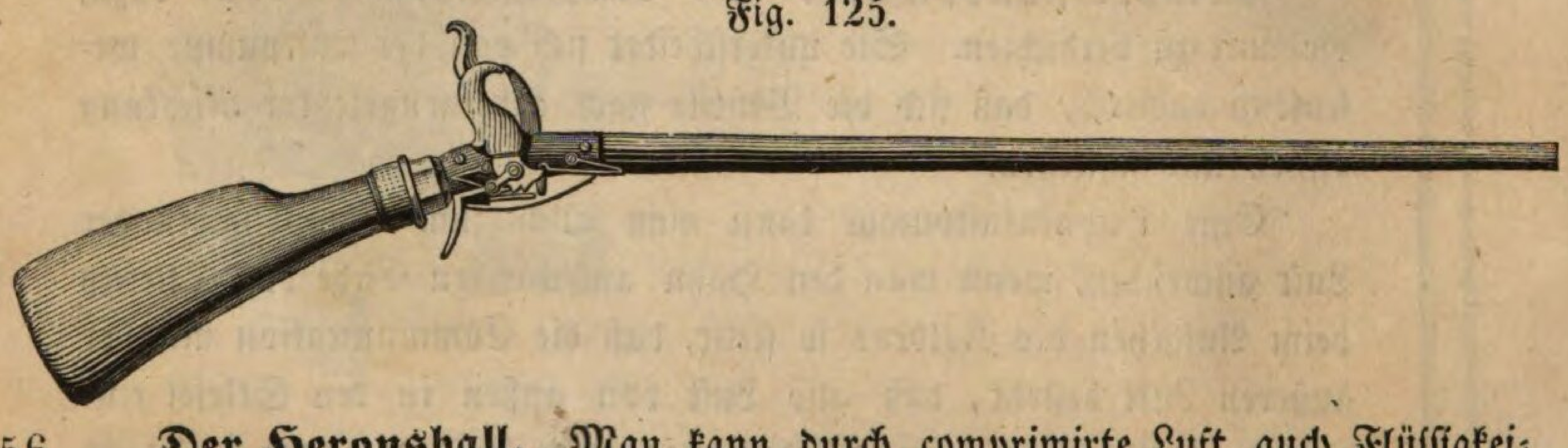
Fig. 124.



treiben des Kolbens in das Reservoir hineingepreßt. Zieht man den Kolben wieder nieder, so kann die Luft aus dem Reservoir nicht zurücktreten, die Röhre füllt sich mit einer neuen Portion Luft, die nun auch in das Reservoir gepreßt wird u. s. w.

Wenn man mit Hülfe der Compressionspumpe die Luft im Kolben der Windbüchse bis auf 8 oder 10 Atmosphären comprimirt hat, wird ein Lauf angeschraubt, welcher der Kugel die Richtung geben soll. Wenn das Ventil, welches den Kolben verschließt, durch den Drücker geöffnet wird, so entweicht ein Theil der eingeschlossenen Luft mit großer Gewalt und treibt die Kugel fort; das Ventil schließt sich aber augenblicklich wieder. Mit einer guten Windbüchse kann man eine Kugel mit eben so großer Geschwindigkeit fortschießen, wie mit einem Feuergewehre. Man kann, ohne von Neuem zu laden, mehrere Schüsse nach einander thun, und zwar um so mehr, je größer der Kolben ist.

Fig. 125.



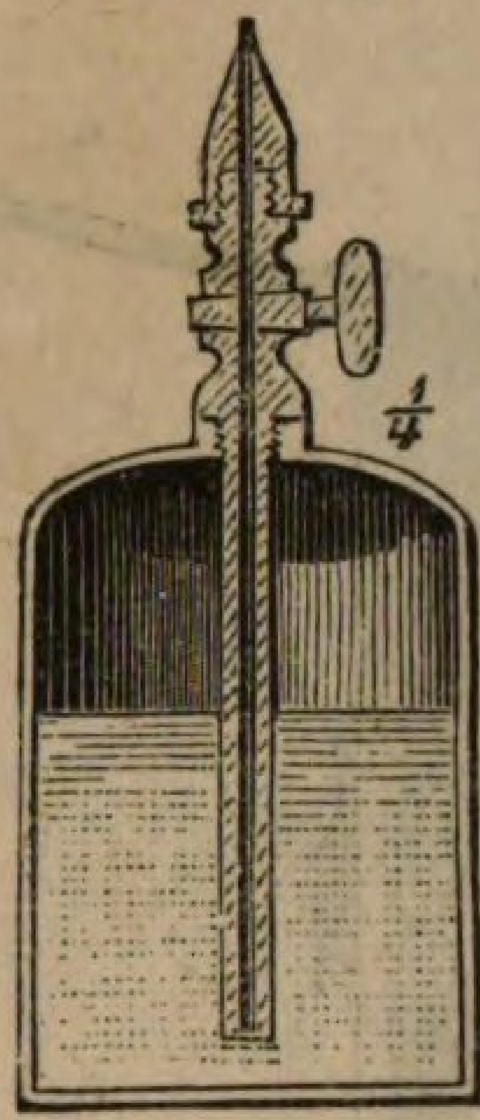
56 **Der Heronsball.** Man kann durch comprimirte Luft auch Flüssigkeiten mit großer Gewalt aus den Gefäßen heraustreiben, wie dies z. B. beim Heronsball der Fall ist. Durch den Hals eines Gefäßes, welches nur zum Theil mit Wasser gefüllt ist, geht eine Röhre fast bis auf den Boden. Die Röhre endigt oben in eine Spitze mit feiner Oeffnung. Wenn die Luft im oberen Theile des Gefäßes auf irgend eine Weise comprimirt worden ist, so treibt der Druck, den sie auf die Oberfläche des Wassers ausübt, dasselbe aus der feinen Oeffnung in Gestalt eines aufsteigenden Strahls hervor. Man kann zum Gefäß ein Arzneiglas nehmen, welches durch einen Kork verschlossen ist, in welchem

eine zu einer feinen Spitze ausgezogene Glasröhre steckt Fig. 126. Wenn die Glasröhre

Fig. 126.



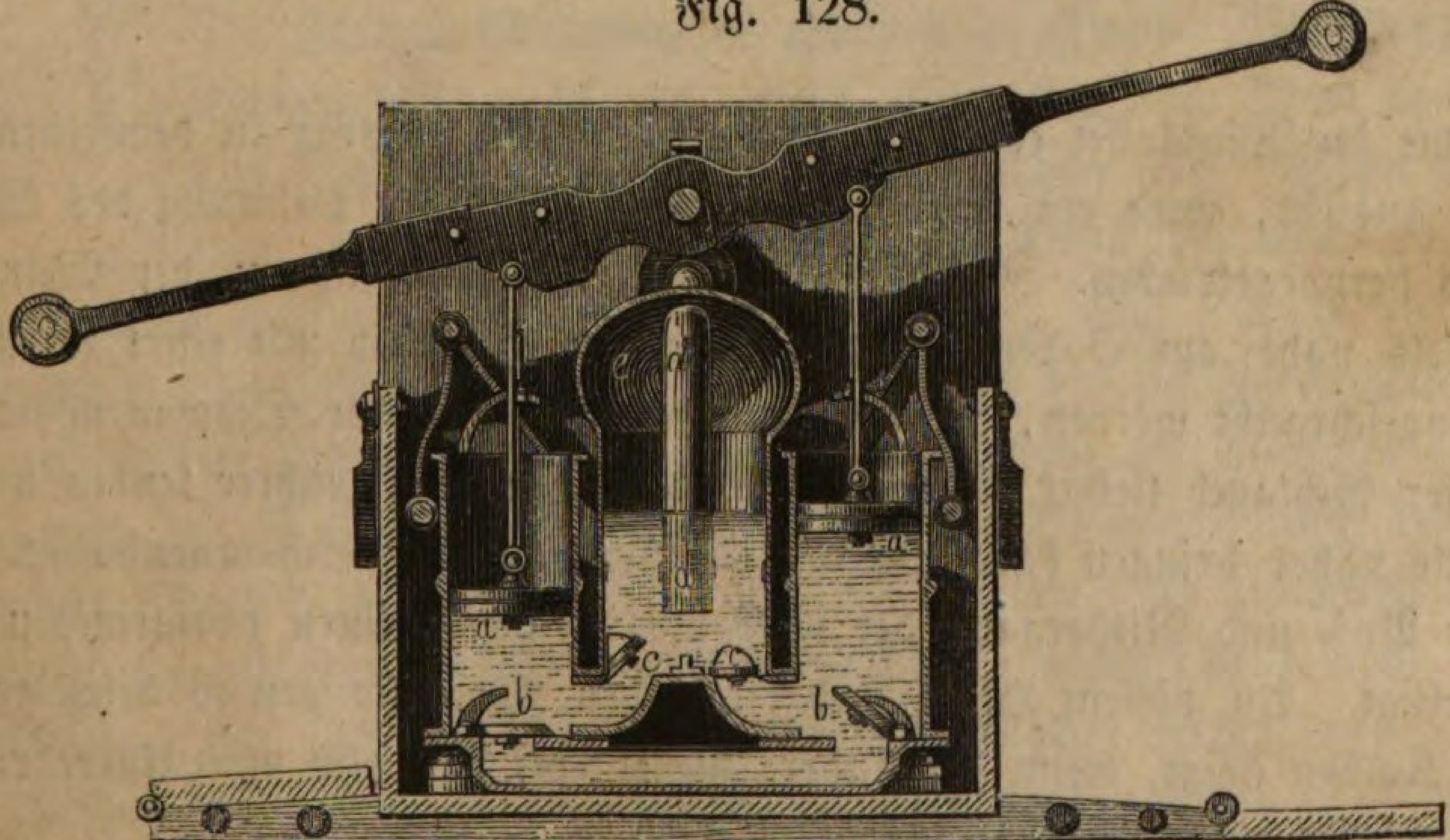
Fig. 127.



wenig oder gar nicht in das Gefäß hineinragt, so hat man die sogenannten Spritzflaschen, mit welchen die Chemiker ihre Niederschläge auswaschen. Die Compression der Luft geschieht bei dieser Art von Heronsball mit Hülfe des Mundes, indem man die Luft durch die Röhre einbläst. Wenn die im Apparat eingeschlossene Luft die Dichtigkeit der umgebenden Atmosphäre hat, und man denselben unter die Glocke der Luftpumpe setzt, so beginnt das Springen, sobald man evacuirt. Manchmal führt man diese Apparate in größerem Maßstabe ganz in Metall aus. In diesem Falle ist im Halse ein Hahn befestigt, Fig. 127, über welchen die Ausflußspitze angeschraubt werden kann. Die Compression der Luft geschieht mittelst einer Compressionspumpe, welche man an der Stelle der Spitze aufschraubt. Wenn das Gefäß geladen ist, schließt man den Hahn, entfernt die Pumpe und schraubt die Spitze auf. Sobald nun der Hahn geöffnet wird, springt das Wasser hervor bis zu einer Höhe von 30, ja von 100 Fuß, wenn die Luft auf 2 oder auf 5 bis 6 Atmosphären comprimirt worden war.

Die Feuerspritze. Fig. 128 ist eine Verbindung der Druckpumpe mit 57
dem Heronsball. Die Pumpenstiefel, von denen wir vor der Hand nur den einen rechts betrachten wollen, stehen in einem mit Wasser gefüllten Kasten. Wenn der Kolben *a* aufgezogen wird, so hebt sich die Klappe *b*, und das Wasser dringt in den Stiefel. Beim Niedergange des Kolbens schließt sich das Ventil *b*, die Klappe *c* wird geöffnet und das Wasser wird durch das Gurgelrohr in den Windkessel *e* gepreßt. Dieser Windkessel ist nichts Anderes als ein großer Heronsball; je mehr Wasser in den Windkessel gepumpt wird, desto mehr wird die Luft im oberen Theile desselben comprimirt. Das Rohr *d* reicht

Fig. 128.



fast bis auf den Boden des Windkessels; außerhalb wird eine Röhre mit enger Oeffnung, der **Schwanenhals**, an das Rohr *d* geschraubt. Durch den Druck,

Fig. 129.

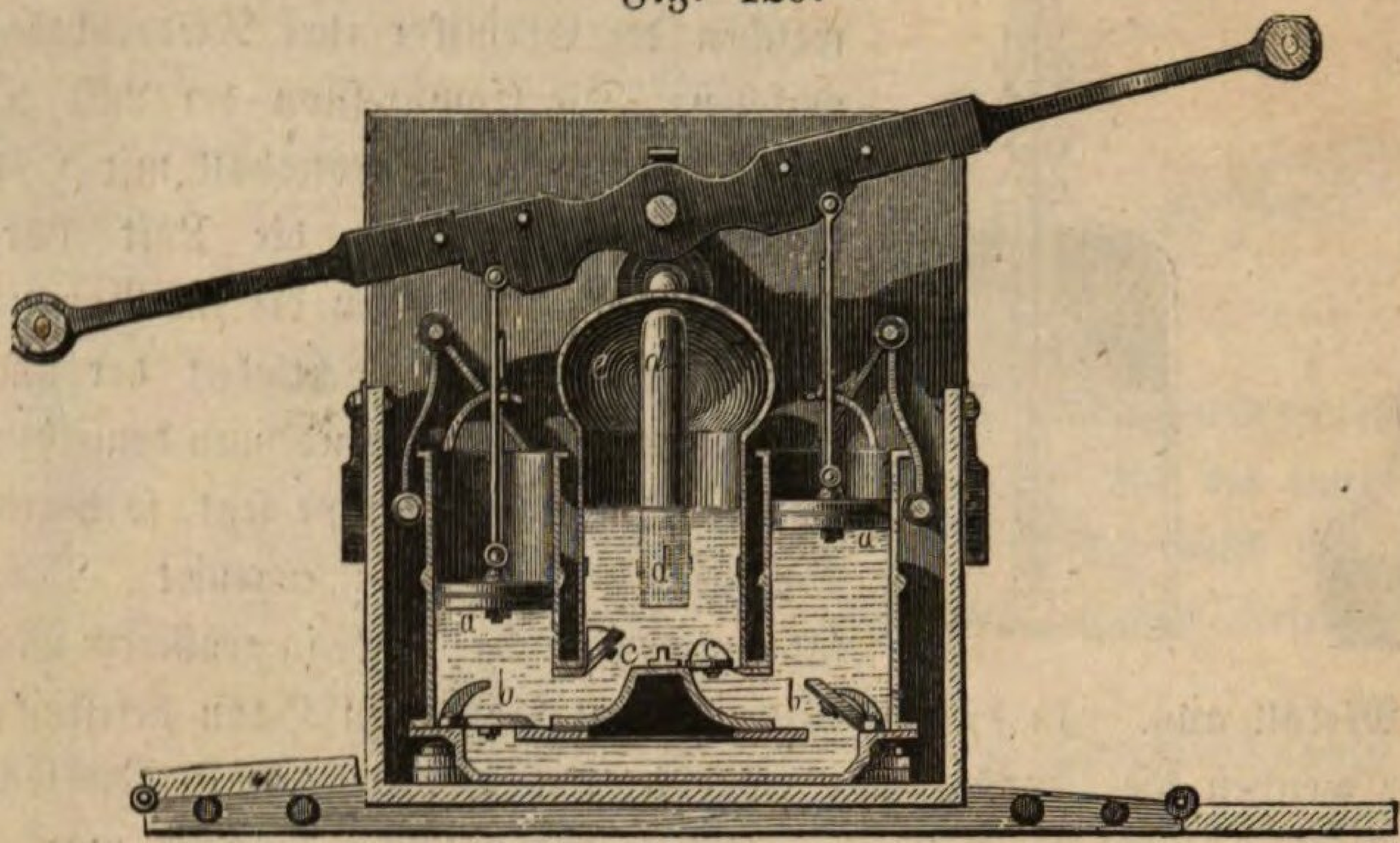
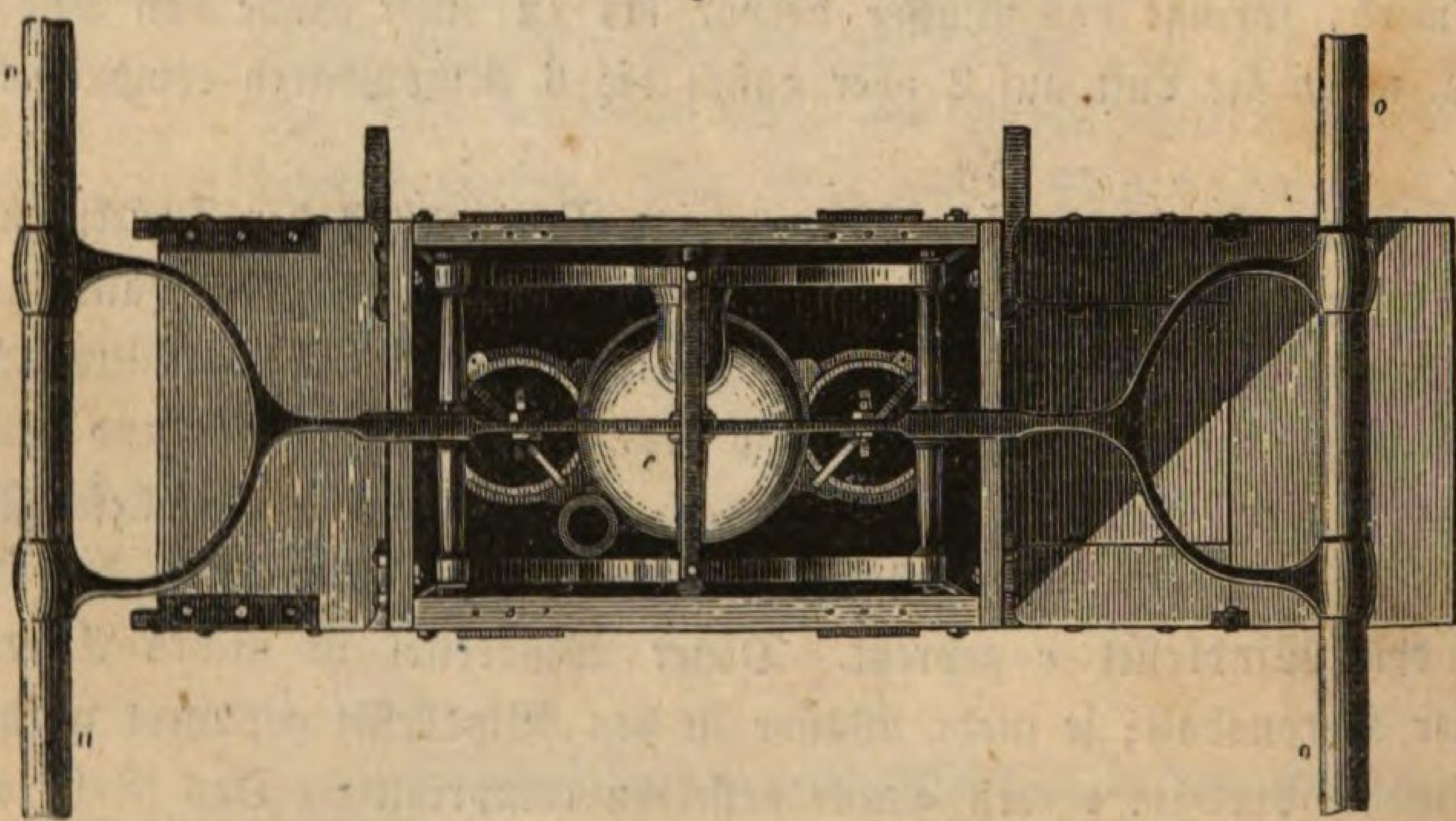


Fig. 130.



welchen die im Windkessel comprimirte Luft auf das Wasser in demselben fortwährend ausübt, wird ein starker Wasserstrahl aus der Oeffnung des Schwanenhalses hervorgetrieben. An einer Oeffnung, welche sich in der Wand des Windkessels nahe am Boden befindet, kann ein Schlauch mit einer metallenen Spitze angeschraubt werden, welche eine Oeffnung wie der Schwanenhals hat; auch dieser Schlauch liefert einen Wasserstrahl, den man leichter lenken und der Feuerstelle näher bringen kann als den Wasserstrahl des Schwanenhalses.

Der Auf- und Niedergang der Kolben wird durch einen zweiarmigen Hebel bewerkstelligt. An diesem Hebel sind die beiden Kolbenstangen so befestigt, daß der eine Kolben steigt, wenn der andere niedergeht, daß also ohne Unterbrechung dem Windkessel neues Wasser zugeführt wird.

Der Heronsbrunnen. Der einfachste Heronsbrunnen, die er sich aus 58
Glasröhren mit Hülfe der Glasbläserlampe machen läßt, ist Fig. 131 dargestellt. Die Wassersäule in der Röhre *a* comprimirt die Luft in *b*, die zusammengepreßte Luft drückt auf den Spiegel des Wassers in *c*, und in Folge dieses Druckes muß das Wasser bei *d* herausspringen. Nach demselben Princip ist auch der Heronsbrunnen Fig. 132 aus Glasröhren, Glaskolben oder Flaschen und einem Trichter zusammengesetzt. Es versteht sich von selbst, daß das Gefäß *c* auf irgend eine Weise unterstützt seyn muß. Wenn man den Apparat in Gang setzen will, füllt man den Kolben *c* fast mit Wasser und verschließt darauf den Hals mit dem Korke, durch welchen die Röhren *b* und *d* hindurchgehen; dann gießt man Wasser durch den Trichter *f* ein, und alsbald beginnt das Springen des Wassers aus der Röhre *d*.

Fig. 131.

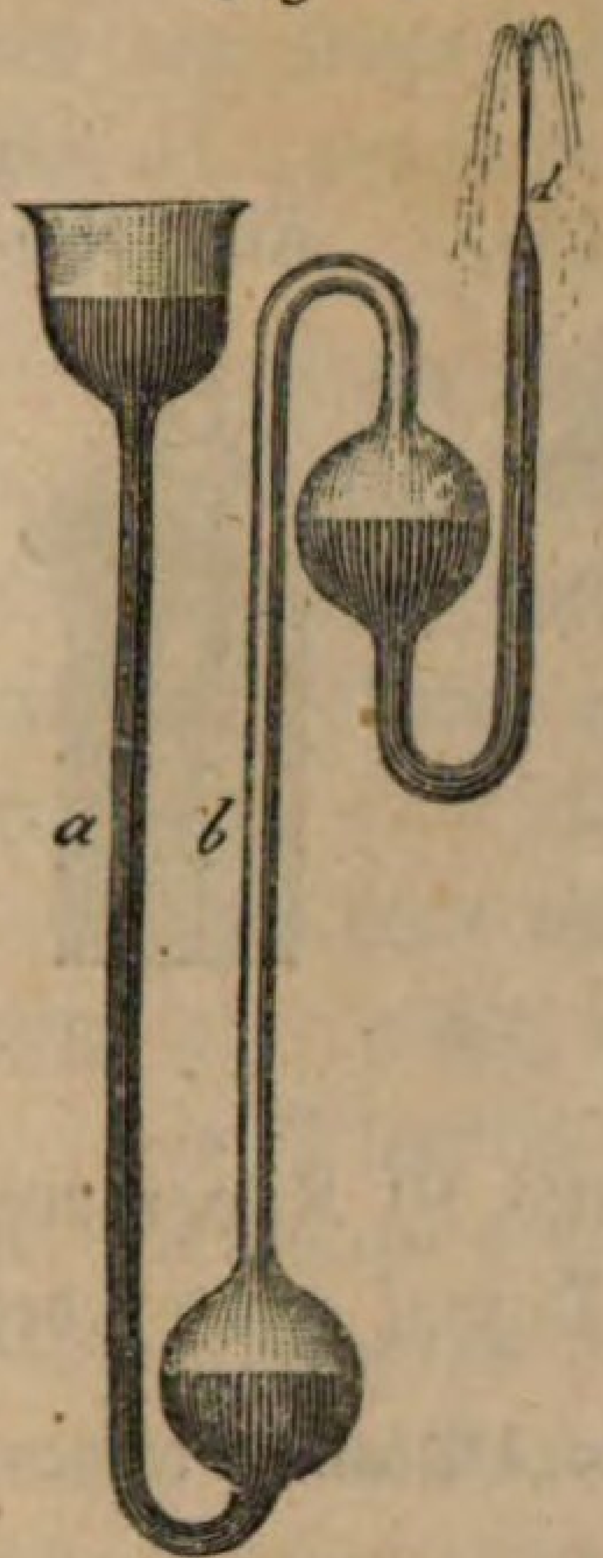


Fig. 132.

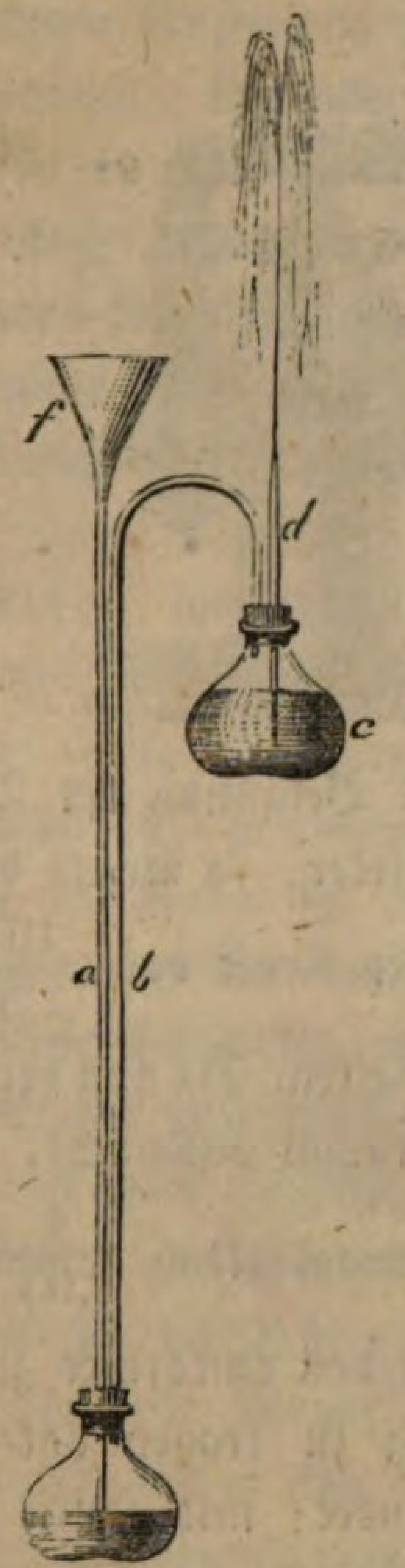
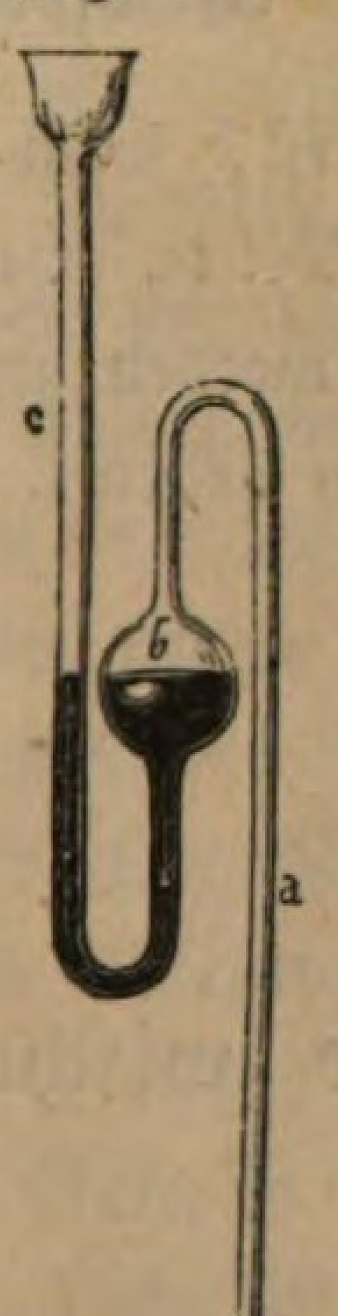


Fig. 133.



Messung des Drucks der 59
Gase. Um den Druck der Gase zu messen, hat man verschiedene Mittel, vorzugsweise wendet man aber Flüssigkeitssäulen oder Ventile an. Apparate, um mit Hülfe von Flüssigkeitssäulen den Druck der Gase zu messen, nennt man Manometer. Die Barometerprobe auf der Luftpumpe und der Compressionsmaschine sind Manometer.

Zu den Manometern gehören in gewisser Beziehung auch die Sicherheitsröhren, denn sie messen den Druck der Gase in den Apparaten, an welchen sie angebracht sind. Wenn die Spannung der Gase in der Retorte dem Druck der Atmosphäre gleich ist, so steht die Flüssigkeit in den beiden Schenkeln, Fig. 133, gleich hoch; ist dies nicht der Fall, so kann man aus der Differenz der Flüssigkeitssäulen in den beiden Schenkeln den Druck im Inneren des abgesperrten Raumes bestimmen, wenn man die Dichtigkeit der Flüssigkeit in der Sicherheitsröhre kennt. Die Sicherheitsröhren sind von Welter erfunden worden; sie gewähren bei vielen chemischen Operationen außerordentliche Vortheile, indem sie sowohl Explosionen, als auch das Zurücksteigen der Sperrungsflüssigkeit verhindern.

In Fig. 134 a. f. S. ist ein Druckventil dargestellt. Wenn man den Querschnitt des Ventils, welcher dem Druck des Dampfes oder des Gases ausgesetzt ist,

und das Gewicht kennt, durch welches das Ventil belastet ist, so kann man die Tension des Dampfes in dem Augenblick berechnen, in welchem er im Stande ist,

Fig. 134.

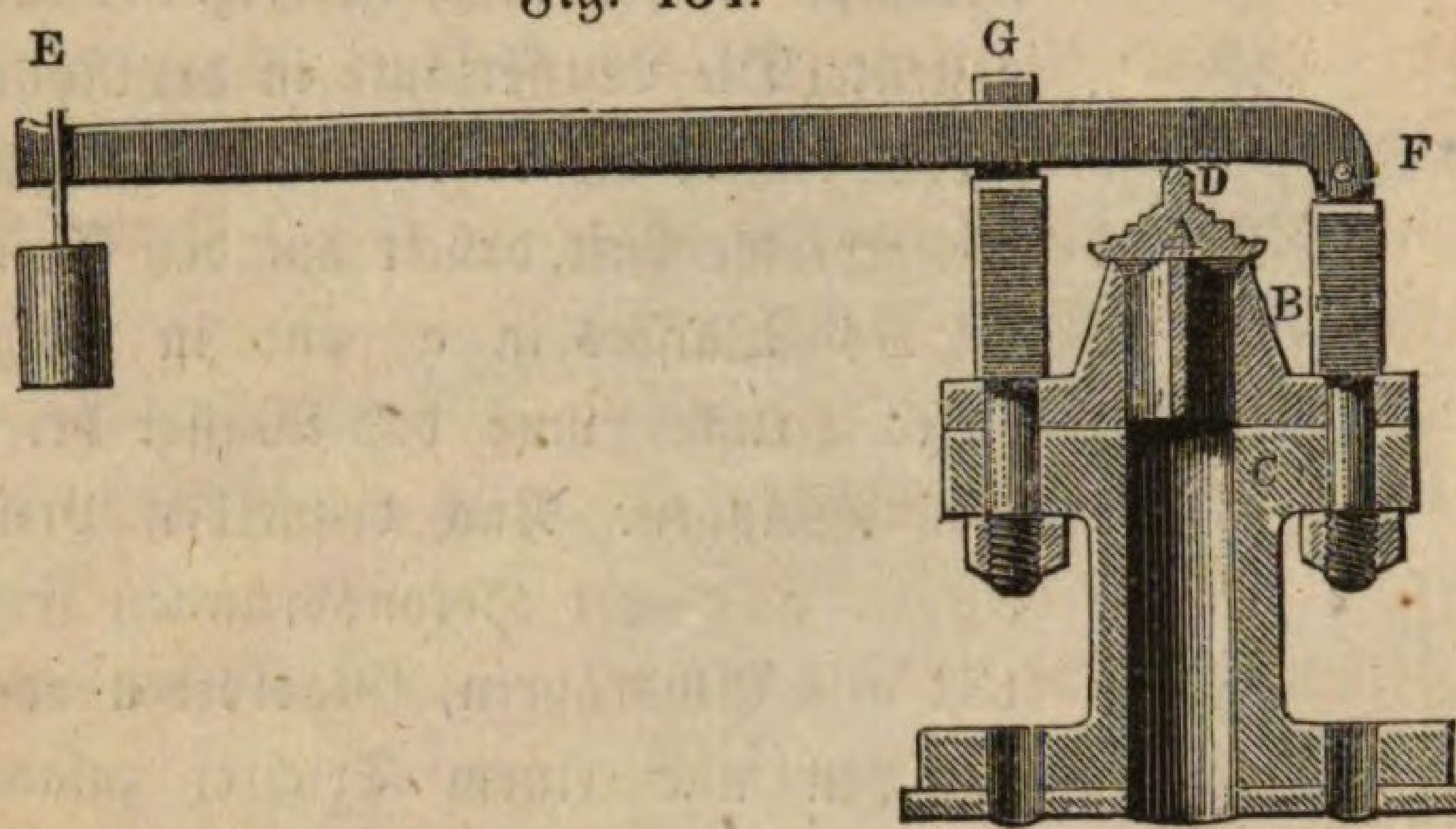


Fig. 135.

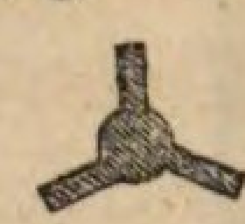


Fig. 136.



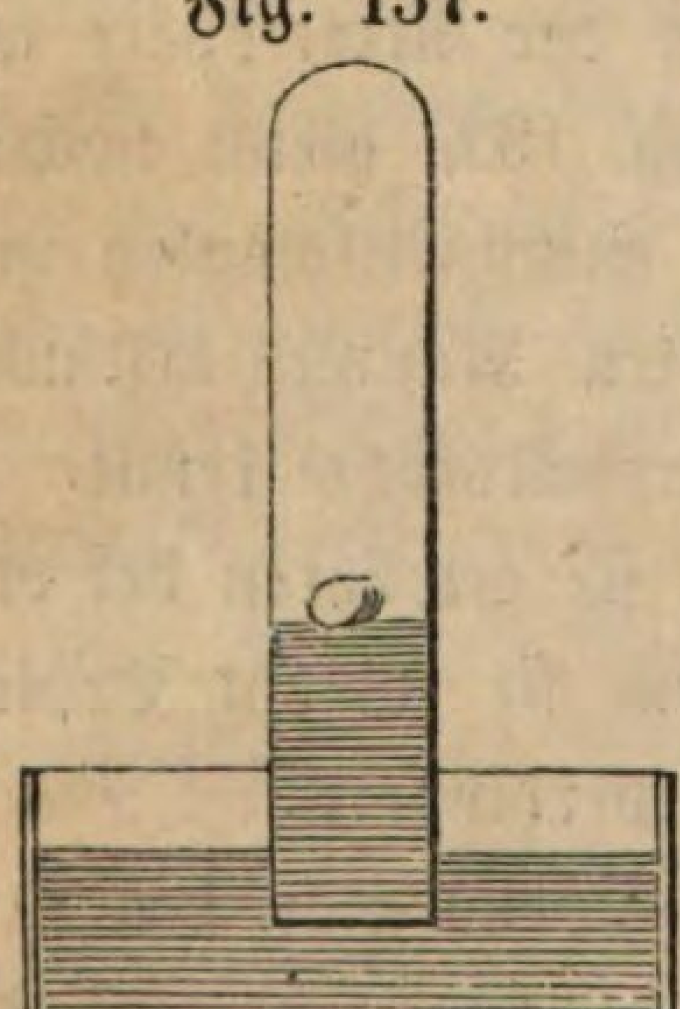
das Ventil zu heben. Betrüge z. B. die Belastung des Ventils 10 Kilogramm und die Ventilfläche 2,5 Quadratcentimeter, so müßte der Dampf gegen jedes Quadratcentimeter dieser Fläche mit einer Kraft von $\frac{10}{2,5} = 4$ Pfund drücken, um dieser Belastung das Gleichgewicht zu halten. Da nun der Druck der Atmosphäre auf jedes Quadratcentimeter 1,03 Kilogramm ausmacht, so ist die Tension des Gases, welches dieses Ventil zu lüften vermag, gleich $\frac{4}{1,03} = 3,87$ Atmosphären, wozu noch eine Atmosphäre wegen des Luftdrucks zu rechnen ist, welchen das Ventil noch außer seiner Belastung zu tragen hat. Dieses Mittel wird bei Flüssigkeiten wie bei Gasen angewendet; mit Hülfe desselben werden auch die Kessel, die Leitungsröhren und die Cylinder der Dampfmaschinen geprüft.

Sechstes Kapitel.

Anziehung zwischen gasförmigen und festen, sowie zwischen gasförmigen und flüssigen Körpern.

60 Daß zwischen den Theilchen fester und gasförmiger Körper eine bedeutende Anziehung stattfindet, geht am augenscheinlichsten aus folgendem Versuche hervor. Löscht man eine glühende Kohle unter Quecksilber ab, läßt man sie dann in einem Cylinder in die Höhe steigen, dessen oberer Theil mit Kohlensäure gefüllt ist, welche durch Quecksilber von der Verbindung mit der äußeren Luft abgesperrt wird, und deren Volumen ungefähr 20mal so groß ist als das der Kohle, so wird in wenig Augenblicken die Kohlensäure von der Kohle dermaßen verdichtet, daß das Quecksilber im Cylin-

Fig. 137.



der bis oben hin steigt. Die ganze Masse der Kohlensäure, welche vorher den ganzen oberen Theil des Cylinders erfüllte, ist jetzt durch die zwischen der Kohle und dem Gase stattfindende Anziehung in den Poren der Kohle verdichtet, das Gas ist absorbirt worden. Derselbe Versuch gelingt auch mit vielen anderen Gasen.

Wenn die Kohle längere Zeit an der Luft gelegen hat, so gelingt der Versuch nicht mehr ganz, was sehr begreiflich ist, wenn man bedenkt, daß die Kohle atmosphärische Luft und den in der Luft verbreiteten Wasserdampf absorbirt, und daß dadurch natürlich ihre Absorptionsfähigkeit für andere Gase vermindert wird.

Wenn man eine Kohle, welche Gase absorbirt hat, unter die Luftpumpe bringt oder glüht, so läßt sie die absorbirten Gase wieder frei.

Die Absorption der Gase ist jederzeit mit einer Wärmeentwickelung begleitet, die um so bedeutender ist, je heftiger die Absorption vor sich geht. Zur Pulverfabrikation wird die Kohle zu einem ungemein feinen Pulver zerrieben, welches die atmosphärische Luft mit solcher Begierde absorbirt, daß eine bedeutende Erhitzung der Masse stattfindet, welche oft bis zur Entzündung steigt.

Wenn ein feiner Strom von Wasserstoffgas auf einen Platinschwamm (fein vertheiltes Platin) geleitet wird, so erfolgt die Absorption des Gases mit solcher Heftigkeit, daß das Platin glühend wird und alsdann das Wasserstoffgas entzündet. Darauf gründet sich die Döbereiner'sche Zündmaschine.

Dadurch, daß sich der feste Körper in einem fein vertheilten Zustande befindet, wie dies beim Kohlenpulver und dem Platinschwamm der Fall ist, wird die Absorption bedeutend befördert, weil alsdann viele Berührungspunkte zwischen dem festen Körper und dem Gase vorhanden sind, doch ist dieser fein vertheilte poröse Zustand nicht durchaus nothwendig, um die Verdichtung der Gase zu bewirken, sie findet auch Statt, wenn der feste Körper eine vollkommen glatte Oberfläche hat, nur ist in diesem Falle die Verdichtung nicht so bedeutend. Wenn man ein Stück Platin mit vollkommen metallischer Oberfläche in ein Gemenge von Sauerstoffgas und Wasserstoffgas bringt, so werden die beiden Gase so sehr verdichtet, daß sie sich allmälig zu Wasser verbinden.

Nicht Platin und Kohle allein zeigen dieses merkwürdige Verhalten gegen Gase, sondern mehr oder weniger alle festen Körper. Jeder feste Körper ist daher gleichsam mit einer verdichteten Atmosphäre von irgend einem Gase umgeben, welche sich oft nur sehr schwer von ihm trennen läßt, und mit welcher sich der Körper, wenn man seine Oberfläche davon auch vollkommen befreit, nach einiger Zeit doch wieder umgiebt, wenn er in Berührung mit Gasen bleibt. So ist z. B. das Glas stets mit einer Hülle von verdichteter Luft umgeben, die man bei der Anfertigung von Barometern ja erst durch das Kochen des Quecksilbers in der Röhre entfernen kann. Gießt man Wasser in einen Glaskolben und bringt man dann denselben über Feuer, so sieht man bald, wie sich an dem Boden eine Menge kleiner Bläschen bilden, noch lange ehe das Kochen des Wassers beginnt. Es ist dies die vorher wegen ihrer großen Verdichtung gar nicht

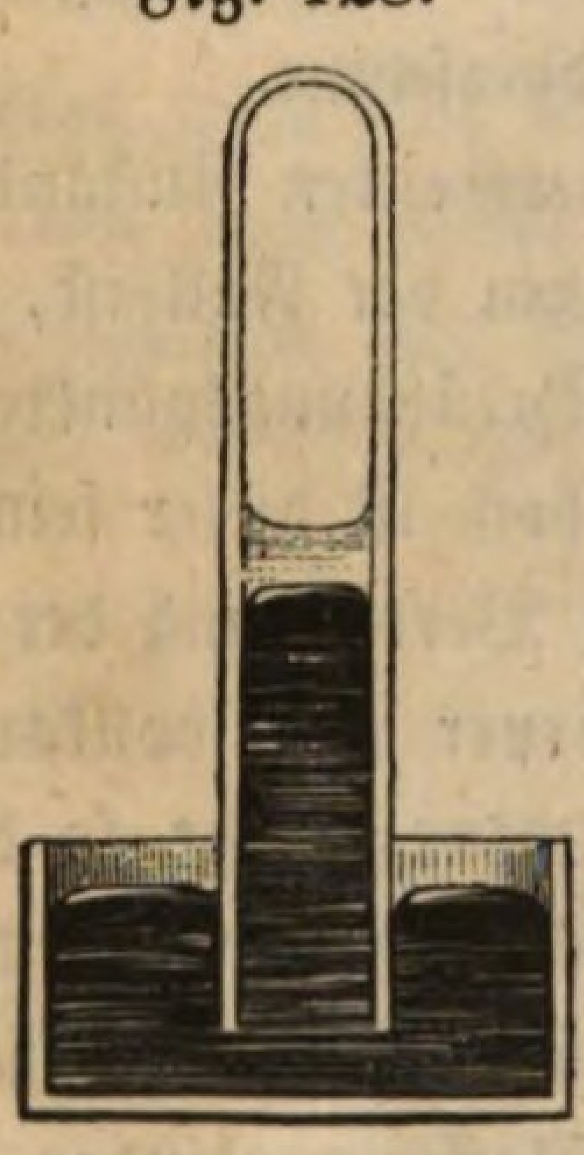
wahrgenommene Luftschicht, die nun, durch die Wärme ausgedehnt, Bläschen bildet. Aehnliche Bläschen sieht man auch, wenn man ein Gefäß mit Wasser unter den Recipienten der Luftpumpe bringt und dann auspumpt.

Solche gasförmige Körper, welche leicht in den flüssigen Zustand übergehen (Dämpfe), werden durch die Anziehung, welche feste Körper auf sie ausüben, flüssig gemacht. So zieht z. B. Chlorcalcium den Wasserdampf mit großer Begierde an, verdichtet ihn zu Wasser und zerfließt endlich in dem Wasser. Auch das Kochsalz zieht den Wasserdampf aus der Luft an und wird feucht; ebenso verhält sich die Pottasche und viele andere Körper.

Solche Körper, welche den Wasserdampf aus der Luft anziehen, heißen hygroskopische Körper; außer den schon angeführten ist auch Holz, Haare, Fischbein u. s. w. hygroskopisch.

61 **Absorption der Gase durch Flüssigkeiten.** Flüssigkeiten zeigen gegen Gase ein ganz ähnliches Verhalten wie das, welches wir soeben bei den festen Körpern betrachtet haben. Man kann dies recht anschaulich machen, wenn man den oben (S. 102) angeführten Versuch in der Weise abändert, daß man die Kohlensäure durch Ammoniak ersetzt und statt der Kohle Wasser aufsteigen läßt, wie Fig. 128 angedeutet ist. Das Ammoniakgas wird von dem Wasser mit solcher Begierde absorbirt, daß alsbald alles Gas verschwunden ist und sich die ganze Röhre mit Flüssigkeit füllt.

Fig. 128.



Das Wasser absorbirt ein 700faches Volumen Ammoniakgas und ein 500faches Volumen Salzsäuregas.

Das Absorptionsvermögen der Flüssigkeiten hängt von der Temperatur und dem Drucke ab, und zwar ist es dem Drucke proportional, so daß sie unter einem Druck von 2, 3 u. s. w. Atmosphären zweimal, dreimal so viel von einem bestimmten Gase absorbiren als unter dem gewöhnlichen Luftdruck.

Mit steigender Temperatur nimmt das Absorptionsvermögen ab.

Das Wasser enthält fast immer eine ziemlich bedeutende Menge absorbirter Luft und kann davon nur durch längeres Kochen befreit werden.

Nach den genauesten Versuchen absorbirt 1 Volumen Wasser bei 0° und 760 Millimeter Druck

0,018	Volumen	atmosphärische Luft,
0,015	»	Stickstoff,
0,032	»	Sauerstoff,
0,859	»	Kohlensäure.

Schaumwein und Sauerwasser sind Flüssigkeiten, welche unter höherem Druck Kohlensäure absorbirt haben, welche zum Theil entweicht, wenn der Druck nachläßt.

Dritter Abschnitt.

Von der Bewegung und den beschleunigenden Kräften.

Erstes Kapitel.

Verschiedene Arten der Bewegung.

Ruhe und Bewegung. Ein Körper, welcher seine Stellung gegen andere ändert, ist in Bewegung; er ist in Ruhe, wenn keine solche Veränderung mit ihm vorgeht. Alle Ruhe, alle Bewegung, welche wir beobachten, ist nur relativ, nicht absolut. Die Bäume sind in Ruhe in Beziehung auf die benachbarten Berge; die Bäume haben eine unveränderliche Stellung auf dem Erdboden; aber Bäume und Berge sind deshalb nicht in absoluter Ruhe; sie durchlaufen mit dem ganzen Erdball, auf welchem sie fest stehen, die ungeheure Bahn unseres Planeten. Obgleich wir aber wissen, daß wir mit unserer Erde die Himmelsräume durchfliegen, indem sie sich um die Sonne bewegt, so können wir doch über unsere absolute Bewegung nichts sagen, denn wir müßten wissen, ob die Sonne wirklich ein unbewegliches Centrum der Welt ist. Alles aber scheint anzudeuten, daß die Sonne selbst nur ein Planet ist, welcher um eine andere Sonne kreist, die wohl wieder nicht fest ist, ohne daß wir im Stande sind, das Centrum aller Bewegungen zu bestimmen. 62

Wir haben bei der Bewegung zwei wesentliche Dinge zu betrachten, die Richtung und die Geschwindigkeit.

Wenn ein Körper sich stets nach derselben Richtung bewegt, so ist seine Bahn geradlinig, wenn sich aber die Richtung seiner Bewegung fortwährend ändert, so ist seine Bewegung krummlinig. Wenn man sich in dem Punkte der krummen Linie, welchen der Körper in einem bestimmten Momente einnimmt,

eine Tangente an die Kurve gezogen denkt, so zeigt uns diese Tangente die Richtung, welche in diesem Augenblick die Bewegung des Körpers hat.

63 **Gleichförmige Bewegung.** Ein Körper hat eine gleichförmige Bewegung, wenn er in gleichen Zeiten gleiche Räume zurücklegt. Wenn ein Körper, der sich in gerader Linie bewegt, in jeder Minute gleich viel, etwa 60 Fuß, fortschreitet, in jeder halben Minute 30, in jeder Secunde 1 Fuß, so bewegt er sich gleichförmig. Weil die in gleichen Zeiten durchlaufenen Räume gleich sind, so folgt, daß das Verhältniß zwischen Zeit und Raum constant bleibt. Dieses Verhältniß nennt man die Geschwindigkeit der gleichförmigen Bewegung. Die Zahl, welche die Geschwindigkeit ausdrückt, hängt davon ab, welche Einheiten man für Raum und Zeit wählt. Wollte man die Geschwindigkeiten nur durch eine Zahl ausdrücken, ohne anzugeben, welcher Einheiten man sich bedient, so würde die Geschwindigkeit noch durchaus unbestimmt seyn. Am einfachsten drückt man die Geschwindigkeit dadurch aus, daß man angiebt, wie weit sich der Körper in der Zeiteinheit, etwa in einer Minute, einer Secunde, bewegt. So geht z. B. ein erwachsener Mensch in der Regel mit einer Geschwindigkeit von 2,5 Fuß in der Secunde. Ein gewöhnlicher Wind hat eine Geschwindigkeit von 60 Meter in der Minute, der Sturmwind aber 2700 Meter in der Minute. Die beiden letzten Geschwindigkeiten sind unter sich vergleichbar, weil sie in denselben Einheiten ausgedrückt sind; die Geschwindigkeit des Sturmwindes ist 45mal so groß als die des gewöhnlichen Windes. Wollte man die oben angegebene Geschwindigkeit des Menschen mit der des Sturmwindes vergleichen, so müßte man sie erst auf gleiche Einheit reduciren.

Weil die Materie träg ist, muß sich ein Körper, welcher einmal eine gleichförmige Bewegung hat, fortwährend nach derselben Richtung und mit derselben Geschwindigkeit bewegen, es müßte denn ferner noch eine zweite Kraft auf ihn wirken, welche entweder seine Richtung allein, oder seine Geschwindigkeit allein, oder beide zugleich ändert; denn durch sich selbst kann ein Körper in dieser Hinsicht nichts verändern, weder den Zustand der Ruhe, noch den der Bewegung. Auf diese Weise ist das Gesetz der Trägheit zu verstehen, und nicht wie es sich die alten Philosophen dachten, welche meinten, daß die Materie eine vorherrschende Neigung zur Ruhe habe.

Wenn wir sehen, daß die Bewegung eines Körpers irgendwie verändert wird, daß seine Geschwindigkeit ab- oder zunimmt, daß die Bewegung ganz aufhört oder daß sie ihre Richtung ändert, so ist diese Veränderung jederzeit durch eine äußere Ursache veranlaßt. Ein Stein, den wir nach der Sonne werfen, müßte bis zur Sonne fortfliegen, wenn er nicht durch den Widerstand der Luft und durch die Schwere, welche ihn nach der Erde zurückzieht, daran gehindert würde.

64 **Beschleunigte und verzögerte Bewegung.** Eine stetige Veränderung der Geschwindigkeit kann nur durch eine fortwährend wirkende Kraft hervorgebracht werden, eine solche Kraft aber nennt man eine beschleunigende oder eine verzögernde, je nachdem durch sie die Bewegung beschleunigt oder

verzögert wird. Wenn in irgend einem Moment der veränderlichen Bewegung alle beschleunigenden oder verzögernden Kräfte zu wirken aufhörten, so würde von dem Augenblick an die Bewegung eine gleichförmige seyn; die Geschwindigkeit einer veränderlichen Bewegung in einem gegebenen Augenblick bestimmt man dadurch, daß man ausmittelt, wie weit sich der Körper in der Zeiteinheit bewegen würde, wenn von dem fraglichen Momente an alle Beschleunigung und Verzögerung aufhörte.

Eine Bewegung heißt **gleichförmig beschleunigt** oder **gleichförmig verzögert**, wenn die Geschwindigkeit in gleichen Zeiten gleichviel zu- oder abnimmt. Solche Bewegungen werden durch Kräfte hervorgebracht, welche fortwährend gleich stark wirken, wie dies bei der Schwere der Fall ist. Ein schwerer Körper fällt mit gleichförmig beschleunigter Geschwindigkeit.

Die Gesetze des freien Falles lassen sich durch sehr einfache Betrachtungen entwickeln.

Da die Schwere in jedem Momente des Falles auf dieselbe Weise wirkt, so muß sie die Geschwindigkeit des fallenden Körpers in gleichen Zeiten auch gleichviel vermehren, d. h. die Bewegung muß eine gleichförmig beschleunigte seyn. Wenn der fallende Körper während der ersten Fallsecunde eine Geschwindigkeit g erlangt, so muß er also auch nach 2, 3, 4 .... t Secunden eine Geschwindigkeit $2g$, $3g$, $4g$ . . . tg erlangt haben. Es läßt sich dies in Worten allgemein so ausdrücken: **die Geschwindigkeit eines frei fallenden Körpers ist stets der verflossenen Fallzeit proportional**; oder es ist

$$v = g \cdot t,$$

wenn v die Geschwindigkeit bezeichnet, welche der Körper während einer Fallzeit von t Secunden erlangt hat, g aber seine Geschwindigkeit am Ende der ersten Secunde darstellt.

Welchen Raum muß aber demnach ein Körper in einer, in 2, 3, 4 . . . t Secunden durchfallen? Zu Anfang der ersten Secunde ist seine Geschwindigkeit gleich o, zu Ende derselben ist sie g. Da nun die Geschwindigkeit gleichförmig zunimmt, so muß der in einer Secunde durchfallene Raum offenbar gerade eben so groß seyn, als ob sich der Körper während einer Secunde mit einer Geschwindigkeit bewegt hätte, welche zwischen der Anfangs- und Endgeschwindigkeit, also zwischen o und g in der Mitte liegt. Diese mittlere Geschwindigkeit aber ist $\frac{1}{2}g$, und ein Körper, der sich eine Secunde lang mit der Geschwindigkeit $\frac{1}{2}g$ bewegt, durchläuft den Raum $\frac{1}{2}g$.

Eben so können wir den Fallraum finden, welchen der Körper in zwei Secunden durchfällt. Die Anfangsgeschwindigkeit ist o, die Endgeschwindigkeit $2g$, also ist die mittlere Geschwindigkeit $\frac{2g}{2}$, und ein Körper, welcher sich zwei Secunden lang mit dieser Geschwindigkeit bewegt, durchläuft einen Raum $2 \cdot 2\frac{g}{2}$.

In drei Secunden durchfällt der Körper einen Raum $3 \,.\, 3 \frac{g}{2}$, denn die Anfangsgeschwindigkeit ist o, die Endgeschwindigkeit $3g$, also die mittlere Geschwindigkeit $3 \frac{g}{2}$, und mit dieser Geschwindigkeit muß ein Körper sich drei Secunden lang gleichförmig bewegen, wenn er denselben Weg zurücklegen soll, den ein schwerer Körper in drei Secunden durchfällt.

Wir wollen diesen Schluß allgemein machen. Wenn ein Körper t Secunden lang fällt, so muß er einen Weg zurücklegen, welcher demjenigen gleich ist, den er während derselben Zeit bei gleichförmiger Bewegung zurückgelegt hätte, wenn seine Geschwindigkeit das Mittel zwischen der Anfangsgeschwindigkeit o und der Endgeschwindigkeit $g \,.\, t$, also $\frac{g}{2} t$ gewesen wäre. Ein Körper aber, welcher sich t Secunden lang mit der Geschwindigkeit $\frac{g}{2} t$ bewegt, durchläuft einen Raum

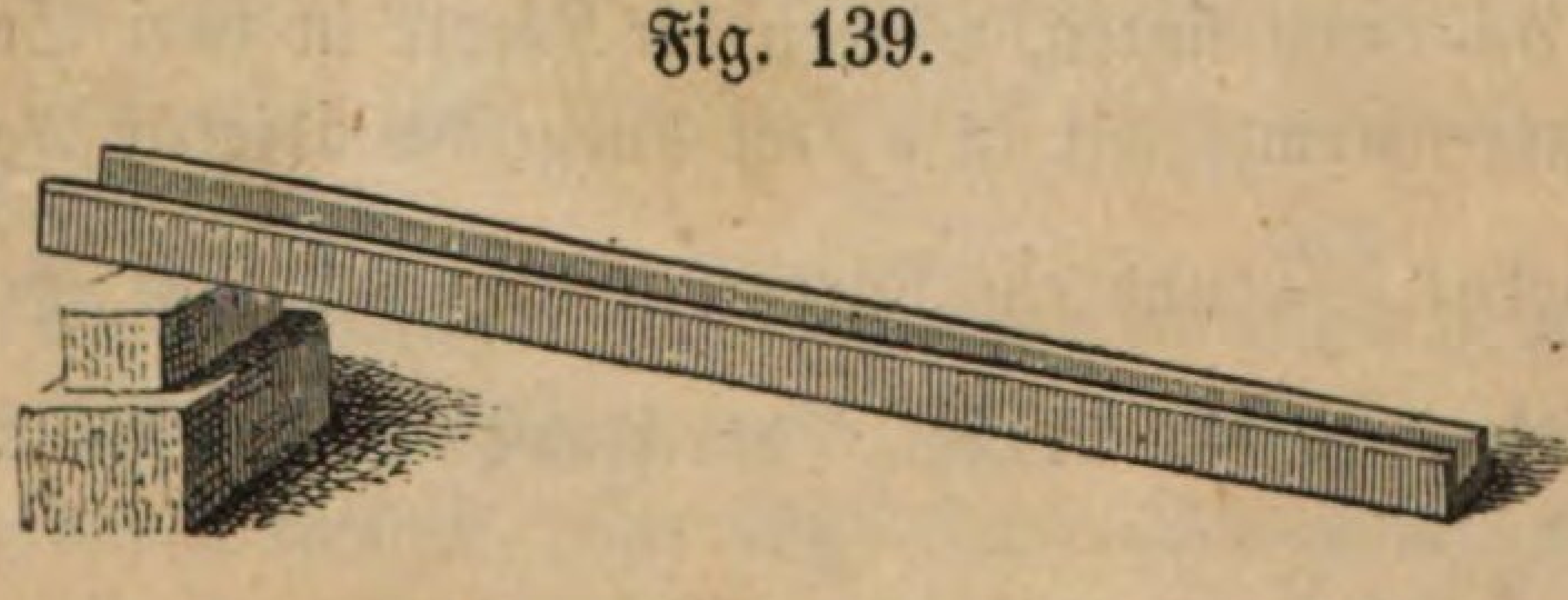
$$s = \frac{g}{2} \,.\, t^2,$$

das heißt in Worten: die Fallräume verhalten sich wie die Quadrate der Fallzeiten.

Ob aber die Voraussetzungen dieser Entwickelung wahr sind, ob die Schwere wirklich eine gleichförmig beschleunigende Kraft sey, darüber kann einzig und allein der Versuch Auskunft geben. Diese Frage kann aber nicht direct gelöst werden, weil die Geschwindigkeit, mit welcher die Körper fallen, so rasch zunimmt, daß es schon nach wenigen Augenblicken unmöglich ist, die in gegebenen Zeiten durchlaufenen Räume genau zu bestimmen. Was aber nicht durch directe Versuche gefunden werden kann, läßt sich durch indirecte Mittel bestimmen. Das einfachste Mittel ist Galiläi's schiefe Ebene, das genaueste aber die Atwood'sche Fallmaschine.

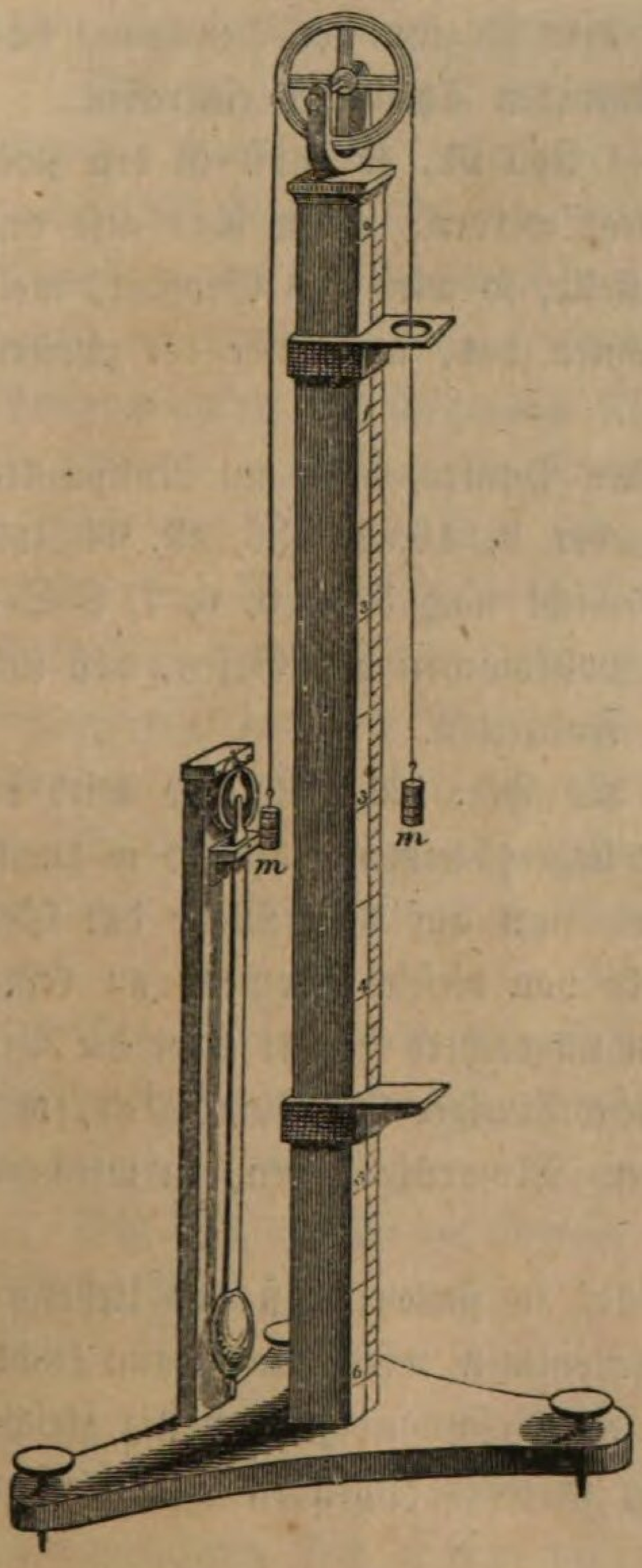
65 **Galiläi's schiefe Ebene.** Galiläi studirte zuerst die Fallgesetze, indem er Kugeln auf einer schiefen Ebene herunterrollen ließ. Zur Anstellung der Galiläi'schen Fallversuche bedient man sich am besten einer Rinne von Holz, etwa 10 bis 12 Fuß lang, Figur 139, welche im Inneren möglichst glatt polirt seyn muß, und welche in Fuß und Zoll eingetheilt ist. Die Rinne wird durch Unterlagen schief gestellt, wie es die Figur zeigt. Wäre die Rinne vollkommen wagerecht gelegt worden, so würde eine darauf gelegte Kugel ruhig liegen bleiben, weil ihre Schwere durch den Widerstand der horizontalen Unterlage gänzlich aufgehoben wird. Wäre die Rinne vertikal gestellt, so würde die Kugel ganz frei mit der vol-

Fig. 139.



len Kraft ihrer Schwere herabfallen. Wird aber die Rinne geneigt, so wird die Kraft der Schwere in einem bestimmten Verhältniß vermindert. Aus den Principien der Statik folgt, daß man die beschleunigende Kraft findet, welche die Kugel zur schiefen Ebene heruntertreibt, wenn man die beschleunigende Kraft der Schwere mit dem Sinus des Neigungswinkels der schiefen Ebene multiplicirt. Welches aber auch das Verhältniß seyn mag, in welchem eine Kraft vermindert wird, mag man sie auf die Hälfte, den dritten, den vierten Theil ihrer ursprünglichen Größe reduciren, so ändert sich dadurch nur die absolute Größe der Bewegung, welche sie erzeugt, während das Verhältniß der in bestimmten Zeiten durchlaufenen Räume unverändert bleibt. Das Gesetz, welches wir aus den Versuchen auf der geneigten Ebene ableiten, ist demnach das wahre Gesetz der Schwere. Läßt man die Kugel in einem bestimmten Moment am oberen Ende der Rinne los, bemerkt man sich die in einer, in zwei, in drei u. s. w. Secunden durchlaufenen Räume, so findet man, die Räume verhalten sich wie die Quadrate der Zeiten, welche nöthig waren, um sie zu durchlaufen. Die Schwere ist demnach wirklich eine gleichförmig beschleunigende Kraft.

Fig. 140.



Die Atwood'sche Fallmaschine 66
besteht im Wesentlichen in einer um eine horizontale Axe leicht drehbaren Rolle, Fig. 140, welche auf dem Gipfel einer ungefähr 6 pariser Fuß hohen vertikalen Säule befestigt ist. Ueber die Rolle ist eine Schnur geschlungen, an deren Enden gleiche Gewichte *m* hängen. Legt man auf der einen Seite ein Uebergewicht *n* auf, so wird das Gleichgewicht zerstört; die Gewichte *m* und *n* auf der einen Seite fallen, das Gewicht *m* auf der anderen Seite wird gehoben. Die Geschwindigkeit, mit welcher diese Bewegung vor sich geht, ist aber weit geringer als beim freien Fall, weil die bewegende Kraft, die Schwerkraft des Uebergewichtes *n*, nicht allein die Masse *n*, sondern die Masse $2m + n$ in Bewegung zu setzen hat.

Wäre z. B. jedes der Gewichte *m* 7 Loth, *n* aber 1 Loth, so hätte das Uebergewicht von 1 Loth eine Masse von 15 Loth in Bewegung zu setzen; die Bewegung wird nach denselben Gesetzen vor sich gehen, wie beim freien Fall, nur mit dem einzigen Unterschied, daß die Intensität der beschleuni-

genden Kraft hier 15mal kleiner ist. Wenn also ein frei fallender Körper in der ersten Secunde 15 Fuß durchfällt, so wird hier der Fallraum der ersten Secunde nur 1 Fuß seyn.

Man sieht wohl ein, daß die Bewegung um so langsamer werden wird, je kleiner das Uebergewicht *n* im Verhältniß zu *m* ist, und man kann also durch zweckmäßige Veränderung von *n* die Bewegung so langsam machen als man will.

Um die Fallräume bequem messen zu können, ist an der vertikalen Säule eine Skale angebracht. Der oberste Punkt der Theilung ist der Nullpunkt der Skale. Zwei Schieber, von denen der obere durchbrochen ist, können an jeder Stelle der Skale festgestellt werden.

Soweit ist die Kenntniß des Apparats nöthig, um den Zusammenhang der Versuche zu verstehen.

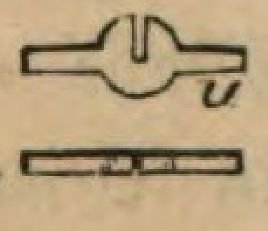
Zunächst läßt sich mit der Fallmaschine leicht darthun, daß sich die Fallräume wie die Quadrate der Fallzeiten verhalten. Es sey *n* so gewählt, daß der Fallraum der ersten Secunde 1 Zoll ist. Wenn das untere Ende des Gewichts *m*, welches das Uebergewicht trägt, sich in der Höhe des Nullpunktes der Skale befindet, so wird eine Secunde nach dem Beginn der Bewegung das Gewicht bei dem ersten nach dem Nullpunkt folgenden Theilstrich eintreffen.

Wenn der Fallraum der ersten Secunde 1 Zoll ist, so muß in den zwei ersten Secunden ein Weg von 4 Zoll zurückgelegt werden; wenn man also den unteren Schieber 4 Zoll unter den Nullpunkt stellt, so wird das Gewicht, welches beim Punkte Null seine Bewegung begonnen hat, am Ende der zweiten Secunde aufschlagen.

Wenn man die Bewegung stets in demselben Punkte, d. h. im Nullpunkte der Skale beginnen läßt, so hat man den Schieber 9, 16, 25, 36, 49, 64 Zoll unter diesem Punkte festzustellen, wenn das Gewicht nach 3, 4, 5, 6, 7, 8 Secunden aufschlagen soll. Der Versuch bestätigt vollkommen das Gesetz, daß sich die Fallräume verhalten wie die Quadrate der Fallzeiten.

Wenn man dem Uebergewicht die Form der Fig. 141 giebt, so wird es auf dem durchbrochenen Schieber liegen bleiben, während *m* durch den Schieber hindurchgeht. Wenn nun auf diese Weise das Gewicht abgenommen wird, so wirkt von diesem Moment an keine beschleunigende Kraft mehr, dessen ungeachtet dauert aber die Bewegung fort; und zwar mit gleichförmiger Geschwindigkeit, mit derjenigen nämlich, welche die Massen *m* in dem Momente haben, in welchem das Uebergewicht abgehoben wird.

Fig. 141.



Man kann nun den durchbrochenen Schieber so stellen, daß das Uebergewicht am Ende der 2., 3. 2c. Fallsecunde abgenommen wird, und dann leicht zeigen, daß nach Abnahme des Uebergewichts die Geschwindigkeit völlig gleichförmig ist, d. h. daß von diesem Augenblick an in jeder folgenden Secunde ein gleich großer Weg zurückgelegt wird.

Beim freien Fall ist der Weg, der in der ersten Fallsecunde zurückgelegt

wird, circa 15 paris. Fuß; in 2, 3, 4 Secunden ist demnach der Fallraum 60′, 135′, 240′ u. s. w. Für den freien Fall ist also der Werth von g ungefähr gleich 30′. Weiter unten bei der Lehre vom Pendel wird der Werth von g genauer angegeben werden.

Es ist häufig von Wichtigkeit, aus den gegebenen Fallhöhen unmittelbar die entsprechende Geschwindigkeit berechnen zu können. Eine Formel, nach welcher diese Rechnung auszuführen ist, ergiebt sich aus den Formeln $v = g \,.\, t$ und $s = \frac{g}{2} t^2$. Durch Elimination von t findet man

$$v = \sqrt{2gs}.$$

Die Geschwindigkeiten verhalten sich also wie die Quadratwurzeln aus den Fallräumen. Wäre z. B. ein Körper von der Höhe von 100 Fuß herabgefallen, so ist nach dieser Formel seine Geschwindigkeit $v = \sqrt{2 \,.\, 30 \,.\, 100} = 77{,}4 \,..$ Fuß (natürlich ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes).

Wenn ein Körper durch irgend einen Stoß vertikal in die Höhe geworfen wird, so wird er mit abnehmender Geschwindigkeit steigen, nach einiger Zeit hört seine aufwärts gerichtete Bewegung auf, und er beginnt zu fallen. Die Gesetze dieser Bewegung folgen unmittelbar aus dem Vorhergehenden.

Gesetzt, der Körper sey mit einer Geschwindigkeit von 150′ in die Höhe geworfen worden, so würde er, wenn die Schwere nicht wirkte, in jeder Secunde 150′ steigen. Da die Schwere einem fallenden Körper in 1, 2, 3, 4, 5 Secunden eine Geschwindigkeit von 30′, 60′, 90′, 120′, 150′ u. s. w. ertheilt, welche der Richtung unserer Bewegung entgegengesetzt ist, so ist klar, daß die Geschwindigkeit des steigenden Körpers am Ende der 1sten Secunde 150 — 30 = 120′ ist; am Ende der 2ten Secunde ist diese Geschwindigkeit 150 — 60 = 90′; am Ende der 3ten 150 — 90 = 60′; am Ende der 4ten 150 — 120 = 30′; am Ende der 5ten endlich 150 — 150 = 0, und nun beginnt also der Körper zu fallen. Wir haben hier das Beispiel einer gleichförmig verzögerten Bewegung, denn die Geschwindigkeit des steigenden Körpers nimmt in jeder Secunde um gleich viel, nämlich um 30′, ab.

Stellen wir dies allgemeiner dar. Es sey n die Geschwindigkeit im Beginn des Steigens, so ist die Geschwindigkeit des Körpers nach t Secunden

$$v = n - gt.$$

Das Steigen hört auf, wenn $n = gt$, d. h. wenn die in t Secunden erlangte Fallgeschwindigkeit der Geschwindigkeit gleich ist, mit welcher der Körper zu steigen begonnen hat.

Die Zeit, welche der Körper braucht, um den Gipfel seiner Bahn zu erreichen, ist

$$t = \frac{n}{g}.$$

Suchen wir nun die Höhe zu bestimmen, welche der steigende Körper nach einer gegebenen Zeit erreicht hat. Bei dem oben gewählten Beispiel würde der Körper nach 1, 2, 3 u. s. w. Secunden die Höhe von 150, 300, 450 u. s. w.

Fußen erreicht haben, wenn die Schwere ihn nicht herabzöge. Wie wir aber gesehen haben, zieht ihn die Schwere in der 1sten Secunde 15 Fuß herab, in 2 Secunden 4.15 oder 60′, in 3 Secunden 9.15 oder 135′. Seine Höhe am Ende der 1sten Secunde ist also 150 — 15 = 135′; am Ende der 2ten, 3ten Secunde ist seine Höhe 300 — 60 = 240′, 450 — 135 = 315′ u. s. w. Nach 5 Secunden hätte er die Höhe von 750′ erreicht, ist aber durch die Wirkung der Schwere $15 \times 5^2 = 375'$ herabgezogen, er befindet sich also wirklich in einer Höhe von 750 — 375 = 375 Fuß, und nun beginnt er wieder zu fallen.

Betrachten wir die Sache allgemeiner. In t Secunden würde der Körper vermöge seiner ursprünglichen Geschwindigkeit n zu der Höhe nt steigen, er ist aber durch die Schwere um $\frac{g}{2} t^2$ herabgezogen worden, seine wirkliche Höhe ist demnach

$$h = nt - \frac{g}{2} t^2.$$

Da der Gipfel der Bahn erreicht wird, wenn $t = \frac{n}{g}$, so findet man die Höhe des Körpers in diesem Momente, wenn man in der letzten Gleichung statt t diesen Werth setzt; man findet

$$h = \frac{n^2}{g} - \frac{g}{2}\,\frac{n^2}{g^2} = \frac{n^2}{g} - \frac{n^2}{2g} = \frac{n^2}{2g}.$$

In $\frac{n}{g}$ Secunden durchläuft aber ein frei fallender Körper einen Raum

$$\frac{g}{2} \cdot \frac{n^2}{g^2} = \frac{n^2}{2g}.$$

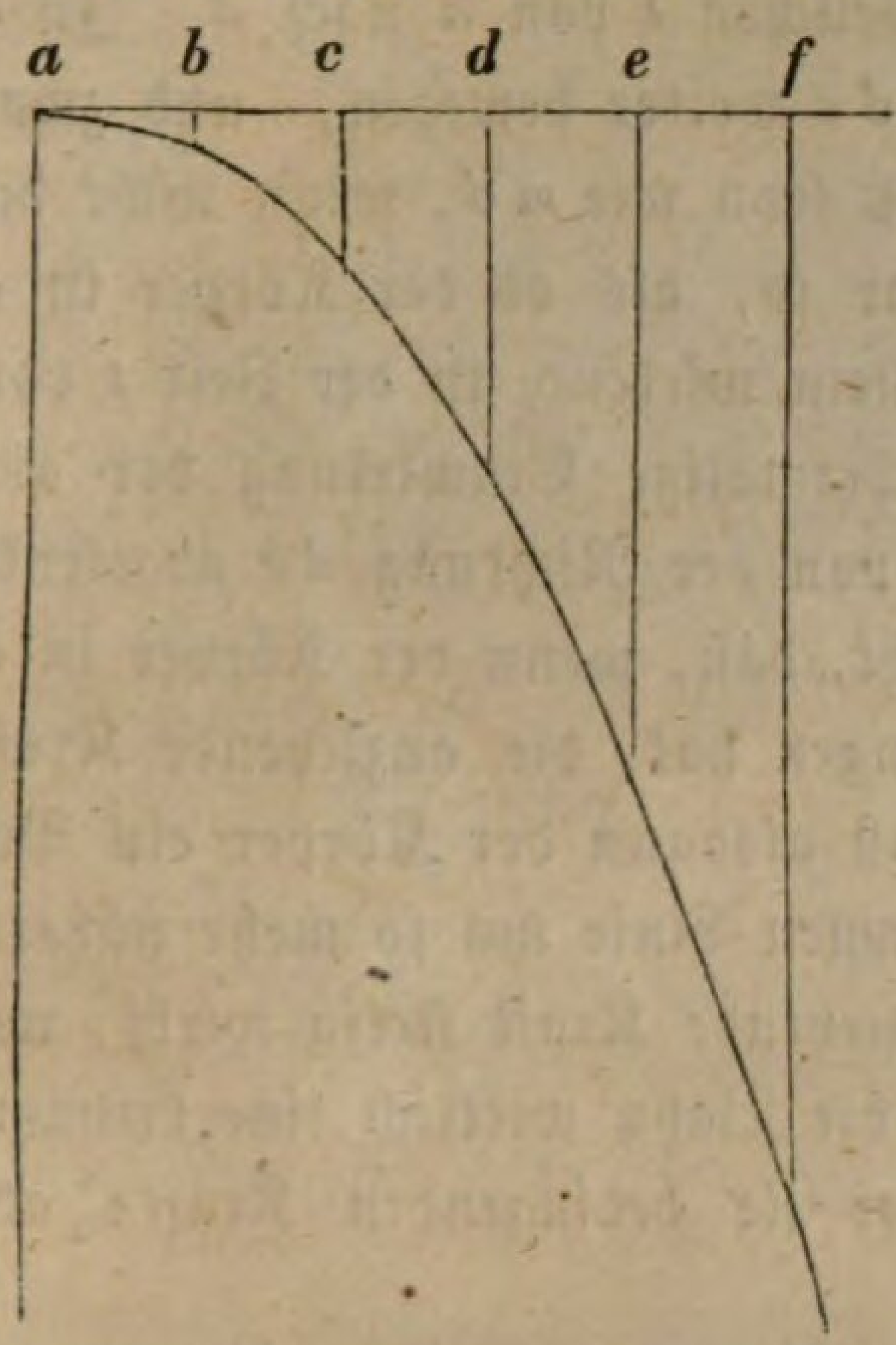
Daraus geht hervor, daß der Körper zum Herabfallen genau eben so viel Zeit braucht als zum Steigen.

Suchen wir die Geschwindigkeit, mit welcher der herabfallende Körper wieder in dem Punkte ankommt, in welchem er die steigende Bewegung begann. Wir finden sie nach der Formel $v = gt$; da aber die Fallzeit $t = \frac{n}{g}$, so ergiebt sich $v = n$, d. h. der Körper kommt mit derselben Geschwindigkeit unten wieder an, mit der er zu steigen begann; oder um einen Körper bis zu einer Höhe h vertikal in die Höhe zu treiben, muß man ihm eine Anfangsgeschwindigkeit ertheilen, die gerade so groß ist als diejenige, welche er durch den freien Fall von der Höhe h herab erlangt.

67 **Wurfbewegung.** Wenn ein Körper in einer anderen als in der vertikalen Richtung geworfen wird, so beschreibt er eine krumme Linie, deren Gestalt sich aus den Gesetzen des Falles leicht ableiten läßt. Nehmen wir den einfachsten Fall, nämlich den, daß der Körper durch irgend eine Kraft in

horizontaler Richtung fortgestoßen worden sey. Wenn die Schwere nicht wäre, so würde er sich fortwährend in horizontaler Richtung bewegen, und zwar mit gleichförmiger Geschwindigkeit. Vermöge dieses Stoßes würde er in der ersten Secunde den Weg *ab*, in der zweiten den gleich großen Weg *bc* u. s. w. zurücklegen, er müßte sich also am Ende der ersten, zweiten, dritten u. s. w. Secunde in den Punkten *b*, *c*, *d*, u. s. w. befinden. Durch die Schwere aber ist er gesunken. In der ersten Secunde ist er um 15 Fuß gefallen, er wird sich also am Ende derselben nicht in *b*, sondern 15 Fuß unter *b* befinden. Am Ende der zweiten Secunde ist er 60 Fuß unter *c*, am Ende der dritten 135 Fuß unter *d* u. s. w. Die krumme Linie, welche der Körper auf diese Weise beschreibt ist eine Parabel.

Fig. 142.



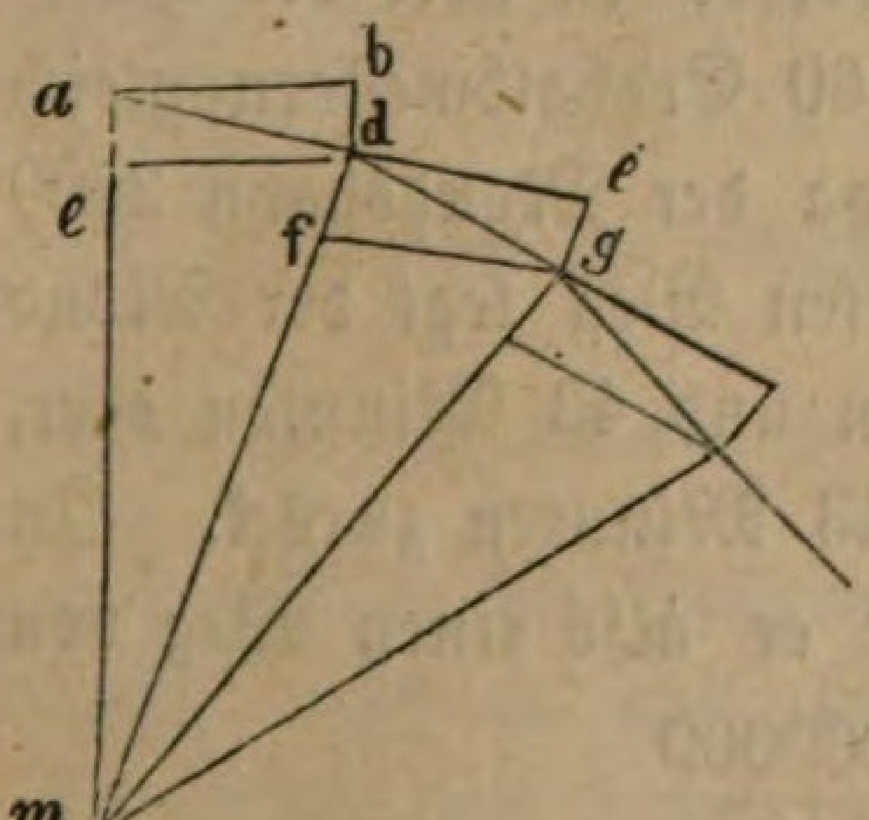
Wenn der Stoß in irgend einer anderen Richtung stattfindet, so läßt sich die Bahn auf dieselbe Weise durch Construction ermitteln.

Die Bahn, welche ein geworfener Körper wirklich beschreibt, weicht wegen des Widerstandes der Luft von der rein parabolischen Gestalt ab.

Centralbewegung. Wir haben jetzt noch einen Fall der durch die Schwere hervorgebrachten Bewegungen zu betrachten, nämlich den, daß wir die Richtung der Schwerkraft in verschiedenen Punkten dieser Bahn nicht mehr als einander parallel betrachten können. Solche Bewegungen beobachten wir am Monde, welcher um die Erde, bei den Planeten, welche um die Sonne kreisen. 68

Denken wir uns, daß der Punkt *a* (Fig. 143), welcher durch eine stetig wirkende Anziehungskraft nach dem Punkte *m* hingetrieben wird, beim Beginne seiner Bewegung durch irgend eine momentan wirkende Kraft einen Stoß in der Richtung *ab* erhalten hätte, so wird er sich weder in der Richtung *ab*, noch in der Richtung *ac* bewegen, sondern in einer anderen *ad*, die sich nach dem Gesetze des Parallelogramms der Kräfte ausmitteln läßt. Um die Betrachtung einfacher zu machen, wollen wir annehmen, daß die stets nach *m* gerichtete anziehende Kraft stoßweise in kleinen Intervallen wirke. Man wird sich bei dieser Betrachtungsweise um so weniger von der Wahrheit entfernen, je kleiner man sich diese Intervallen denkt.

Fig. 143.



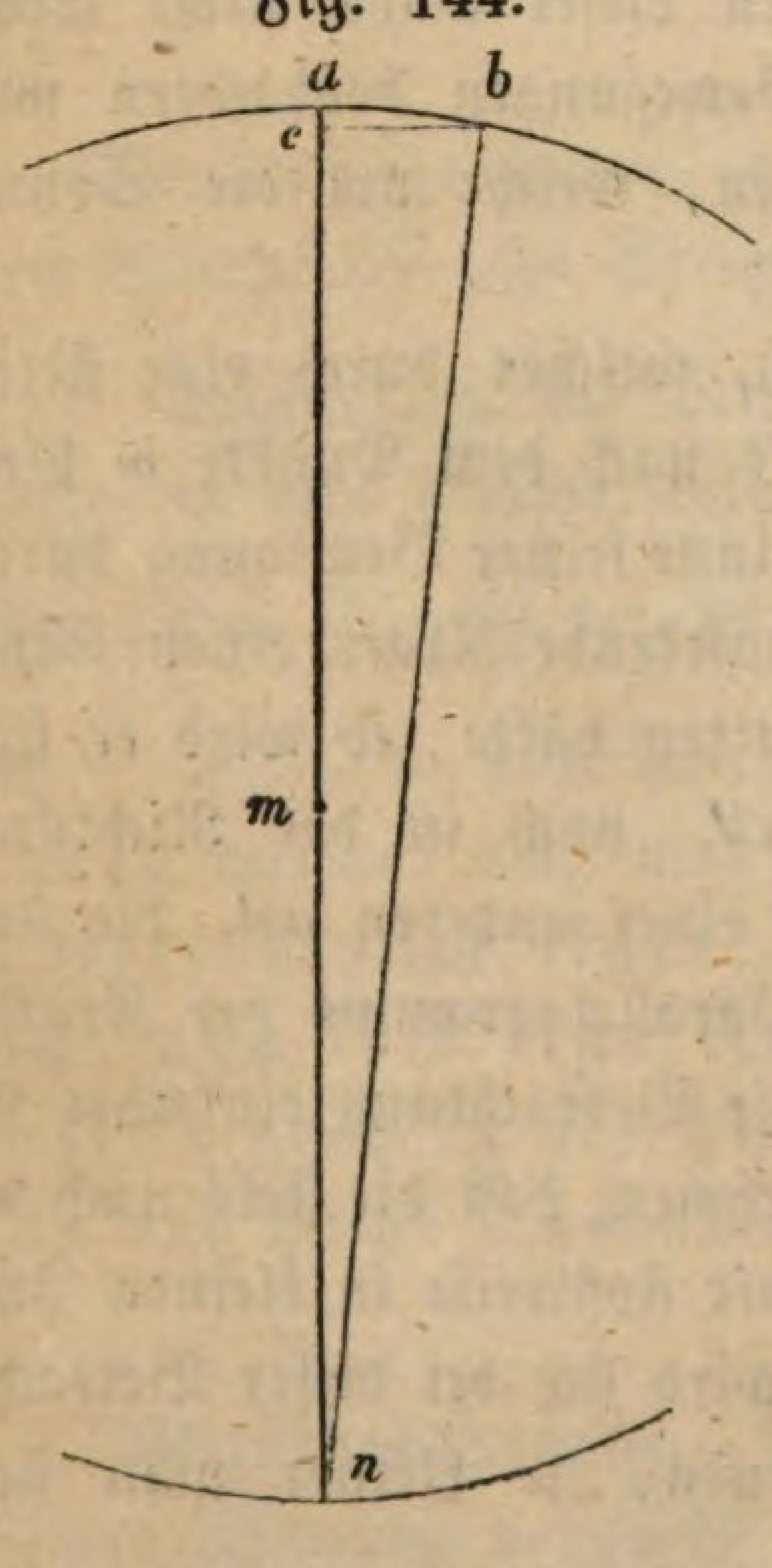
Wenn der seitwärts gerichtete Stoß für sich allein den materiellen Punkt

in einem kleinen Zeittheilchen *t* von *a* nach *b*, die anziehende Kraft, für sich allein wirkend, ihn in derselben Zeit nach *c* führen würde, so bewegt er sich unter Einwirkung beider Kräfte in dem Zeittheilchen *t* von *a* nach *d*. In *d* angekommen würde er sich in der Richtung *de* weiter bewegen, und zwar würde in der Zeit *t* der Weg *de* gerade so groß seyn wie *ad*, wenn nicht die anziehende Kraft von Neuem wirkte, und zwar so, als ob der Körper in *d* einen Stoß erhalten hätte, der ihn, für sich allein wirkend, in der Zeit *t* von *d* nach *f* geführt haben würde. Durch diese abermalige Einwirkung der anziehenden Kraft wird also der Körper wieder von der Richtung *de* abgelenkt und nach *g* geführt. Man begreift daraus leicht, daß, wenn der Körper in *a* einmal einen seitwärts gerichteten Stoß empfangen hat, die anziehende Kraft aber stoßweise in kleinen Intervallen wirkt, daß alsdann der Körper ein Polygon beschreiben muß, welches sich einer krummen Linie um so mehr nähert, je kleiner jene Intervalle sind. Wenn die anziehende Kraft stetig wirkt, wie dies in der Natur wirklich der Fall ist, so ist die Bahn wirklich eine krumme Linie, deren Natur von dem Verhältnisse der sie bedingenden Kräfte abhängt.

Die Kraft, welche den Körper stets nach dem Anziehungsmittelpunkte hintreibt, wird mit dem Namen **Centripetalkraft** bezeichnet. Wenn in irgend einem Moment der Centralbewegung die Centripetalkraft zu wirken aufhörte, so würde von dem Augenblicke an der Körper sich in der Richtung der Tangente fortbewegen, und zwar mit einer Kraft, welche den Namen **Tangentialkraft** führt.

Je nach dem Verhältnisse zwischen Tangentialkraft und Centripetalkraft kann die Bahn ein Kreis, eine Ellipse u. s. w. seyn.

Fig. 144.



Suchen wir nun die Größe der Centripetalkraft zu bestimmen, welche den Mond bei seiner Bewegung um die Erde nach dem Mittelpunkte derselben hintreibt. — Der Umfang der Erde beträgt 40 Millionen Meter; da aber der Halbmesser der Mondsbahn 60 Erdhalbmessern gleich ist, so beträgt der Umfang der Mondsbahn 2400 Millionen Meter. Diesen Weg legt der Mond in 27 Tagen, 7 Stunden und 43 Minuten oder, was dasselbe ist, in 39343 Minuten zurück. In jeder Minute durchläuft er also einen Weg von

$$\frac{2400000000}{39343}$$

oder 61000 Metern. Es sey Fig. 144 *ab* das Bogenstück von 61000 Metern, welches der Mond in einer Minute durchläuft; so ist *ac* der Weg, um welchen sich der Mond in einer Minute ver-

möge der Centripetalkraft der Erde nähern würde, wenn die Wirkung der Tangentialkraft plötzlich vernichtet werden könnte.

Die Größe dieses Weges ac können wir berechnen, wenn wir den Bogen ab für eine gerade Linie nehmen, von welcher er in der That nur unmerklich abweicht. abn ist ein rechtwinkliges Dreieck, bc ein von der Spitze des rechten Winkels auf die Hypotenuse gefälltes Perpendikel, und unter diesen Umständen ist, wie ein bekannter Satz der Geometrie lehrt, ab die mittlere Proportionale zwischen ac und an, es ist also

$$ab^2 = ac \times an$$

und daraus

$$ac = \frac{ab^2}{an}.$$

Nun aber haben wir gesehen, daß $ab = 61000$ Meter ist; an aber, der Durchmesser der Mondsbahn, beträgt 763950000 Meter. Setzt man diese Werthe für ab und an in die letzte Gleichung, so kommt

$$ac = 4{,}87 \text{ Meter},$$

d. h. der Fallraum des Mondes gegen die Erde beträgt in einer Minute 4,87 Meter.

Welches ist aber die Kraft, welche diese Wirkung hervorbringt? Ist es dieselbe Kraft, welche macht, daß der Stein zur Erde fällt? Wenn wir annehmen, daß die Schwerkraft, welche wir auf der Oberfläche der Erde beobachten, auch noch über unsere Atmosphäre hinaus thätig sey, daß sie bis zum Monde hin wirke, so sehen wir wohl ein, daß ihre Intensität mit der Entfernung von der Erde abnehmen muß. Durch eine einfache Schlußweise, welche wir in der Lehre vom Lichte näher betrachten werden, begreifen wir, daß die Intensität aller Wirkungen, welche von einem Punkte ausgehen, im umgekehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung steht. Demnach muß die Intensität der Schwerkraft in doppelter, dreifacher, vierfacher u. s. w. Entfernung vom Erdmittelpunkte, auch 4mal, 9mal, 16mal schwächer seyn. Am Monde ist sie also 60^2 oder 3600mal schwächer als auf der Erdoberfläche, weil ja der Mond 60mal so weit vom Mittelpunkt der Erde entfernt ist. Wenn demnach der Fallraum der ersten Secunde auf der Erdoberfläche 4,9 Meter beträgt, so muß der Fallraum des Mondes gegen die Erde in einer Secunde $\frac{4{,}9}{60^2}$ Meter, also in einer Minute, d. h. in 60 Secunden $\frac{4{,}9}{60^2} \cdot 60^2 = 4{,}9$ Meter betragen. D. h. der Fallraum, welchen der Mond in einer Minute gegen die Erde fällt, muß so groß seyn, wie der Fallraum der ersten Fallsecunde auf der Oberfläche der Erde.

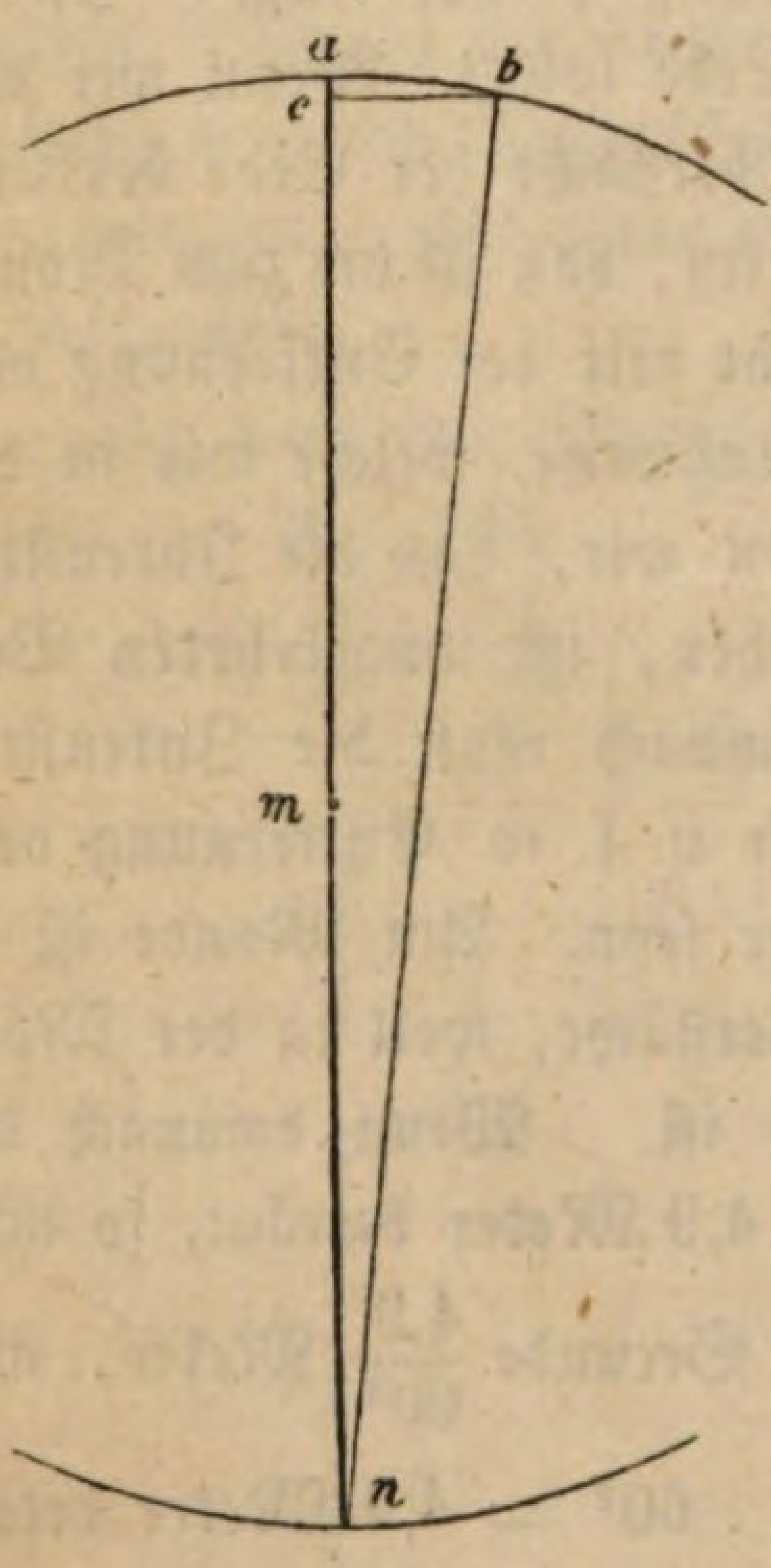
Vergleichen wir den eben berechneten Fallraum des Mondes gegen die Erde, 4,9 Meter in der Minute, mit dem oben aus den astronomischen Beobachtungen abgeleiteten, 4,87 Meter, so finden wir in der That nur eine sehr geringe Differenz, und selbst diese würde weggefallen seyn, wenn wir

nicht der einfacheren Rechnung wegen nur angenäherte Werthe in Rechnung gebracht hätten. So haben wir bei der Umlaufszeit des Mondes die Secunden ganz vernachlässigt und die Entfernung des Mondes von der Erde gleich 60 Erdhalbmessern angenommen, obgleich sie 60,16 Erdhalbmesser beträgt.

Auf dieselbe Weise erklärt sich die Bewegung der Planeten um die Sonne, und so ist es denn ein und dieselbe Kraft, welche den Stein zur Erde treibt und, durch alle Himmelsräume wirkend, die Harmonie unseres Planetensystems erhält. Wir verdanken die Kenntniß dieses großartigen Naturgesetzes der allgemeinen Schwere dem Scharfsinne und dem ausdauernden Fleiße Newton's. Schon diese einzige Entdeckung würde hinreichen, ihm einen unsterblichen Ruhm zu sichern.

Auf demselben Wege, auf welchem wir die Größe der Centripetalkraft bei der Mondsbewegung entwickelt haben, läßt sich auch ein allgemeiner Ausdruck für diese Kraft entwickeln. Nehmen wir als Maaß der Centripetalkraft den Weg ac, um welchen der Körper bei seiner Centralbewegung in der Zeiteinheit gegen den Anziehungsmittelpunkt hingetrieben wird, und bezeichnen wir denselben mit p, so ist, wie oben entwickelt wurde, $p = \frac{ab^2}{an}$. Nun ist aber der Bogen ab derjenige, welchen der Körper in der Zeiteinheit wirklich durchläuft, es ist also $ab = \frac{2\pi r}{t}$, wenn r den Radius der kreisförmigen Bahn und t die Umlaufszeit bezeichnet. Ferner ist an der Durchmesser dieser Bahn, also gleich $2r$. Setzen wir diese Werthe von ab und an in den obigen Werth von p, so kommt $p = \frac{2\pi^2 r}{t^2}$ . . . . . 1)

Fig. 145.

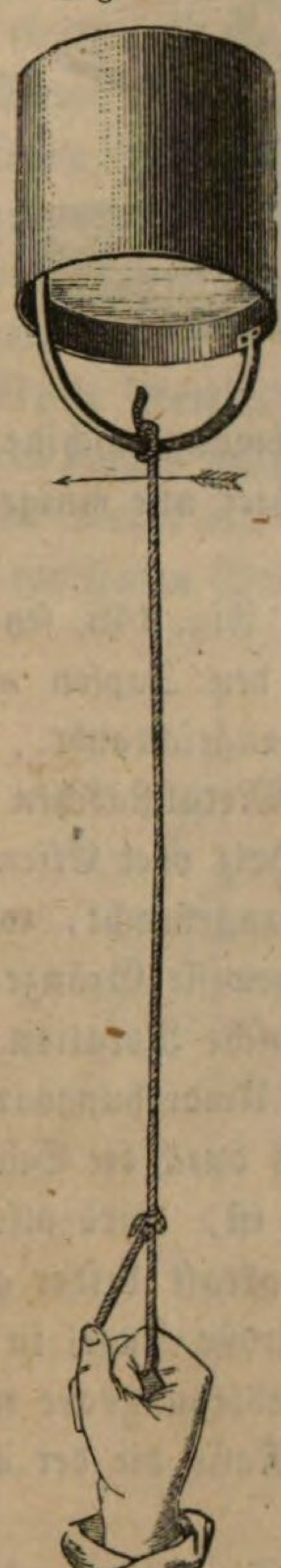


Das heißt: wenn zwei Körper sich in verschiedenen Kreisen und mit verschiedener Umlaufszeit bewegen, so verhalten sich die Centripetalkräfte wie die Halbmesser der beschriebenen Kreise und umgekehrt wie die Quadrate der Umlaufszeiten.

Wenn man irgend einen schweren Körper an dem einen Ende einer Schnur befestigt, und ihn, das andere Ende in der Hand haltend, im Kreise herumschwingt, wie es Fig. 145 andeutet, so wird die Schnur fortwährend eine Spannung auszuhalten haben, welche mit der Schnelligkeit der Umdrehung wächst. Wenn in irgend einem Momente die Schnur durchschnitten würde, so würde der Körper nicht mehr im Kreise sich fortbewegen, sondern

sich vermöge seiner Trägheit in tangentialer Richtung von der Kreisbahn entfernen.

Fig. 146



Die Ursache der Spannung, welche die Schnur erleidet, nennt man **Centrifugalkraft, Fliehkraft, Schwungkraft**. Da aber hier der Widerstand der Schnur denselben Effect hervorbringt, wie die oben bei der freien Centralbewegung betrachtete Centripetalkraft, so ist klar, daß die Centrifugalkraft der Centripetalkraft gleich und entgegengesetzt ist, und daß von der Centrifugalkraft Alles gilt, was von der Centripetalkraft gesagt wurde, d. h. die Schwungkraft wächst im Verhältnisse der Halbmesser der Bahnen und im umgekehrten der Quadrate der Umlaufszeiten. Daß die Spannung des Fadens, daß also die Schwungkraft auch der rotirenden Masse proportional sey, versteht sich von selbst.

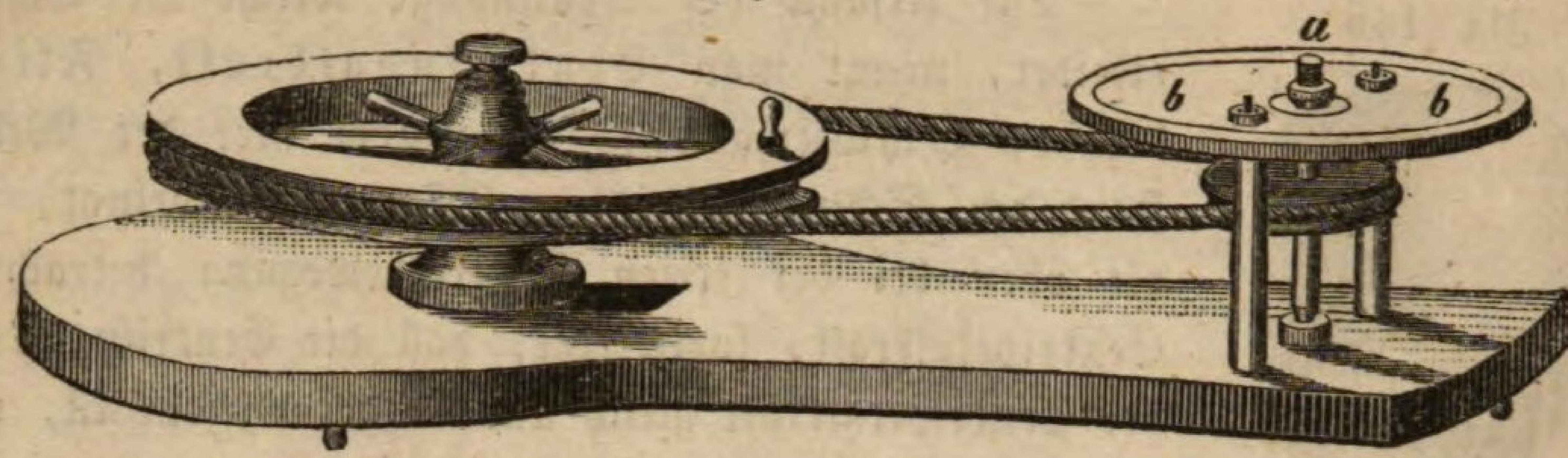
Schwungkraft tritt überall da auf, wo eine Rotation um eine feste Axe stattfindet und die einzelnen Theilchen auf irgend eine Weise verhindert sind, sich von jener Axe zu entfernen. Eine solche Schwungkraft muß also auch bei der Rotation der Erde um ihre eigene Axe erzeugt werden. Da die Umlaufszeit für alle Punkte auf der Erde gleich groß ist, aber die verschiedenen Punkte nicht gleich weit von der Umdrehungsaxe entfernt sind, so ist klar, daß nicht überall auf der Erdoberfläche jene Schwungkraft gleich sey, sondern sich verhalte wie die Entfernungen von der Erdaxe; sie ist also gleich Null an den Polen und erreicht ihr Maximum an dem Aequator.

Diese Schwungkraft, welche am Aequator am größten ist und nach den Polen hin abnimmt, wirkt der Schwere entgegen, sie vermindert gleichsam die Intensität der Schwere. Es läßt sich leicht berechnen, wie groß die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde um ihre Axe seyn müßte, wenn die dadurch erzeugte Schwungkraft am Aequator die Wirkung der Schwere daselbst vollständig aufheben sollte.

Um Versuche über die Schwungkraft anzustellen, wendet man die sogenannte Centrifugal- oder Schwungmaschine an. Eine solche ist in Fig. 147 (a. f. S.) dargestellt. — Eine größere Scheibe ist mit einer kleineren durch eine gespannte Schnur verbunden, so daß, wenn man die größere Scheibe mittelst einer Handhabe umdreht, die Bewegung in der Art auf die kleinere übertragen wird, daß dieselbe eine größere Anzahl von Umdrehungen macht. Schraubt man nun irgend einen Gegenstand auf die Umdrehungsaxe der kleinen Scheibe

auf, so kann man denselben durch Umdrehung der großen Scheibe in sehr rasche Rotation versetzen.

Fig. 147.



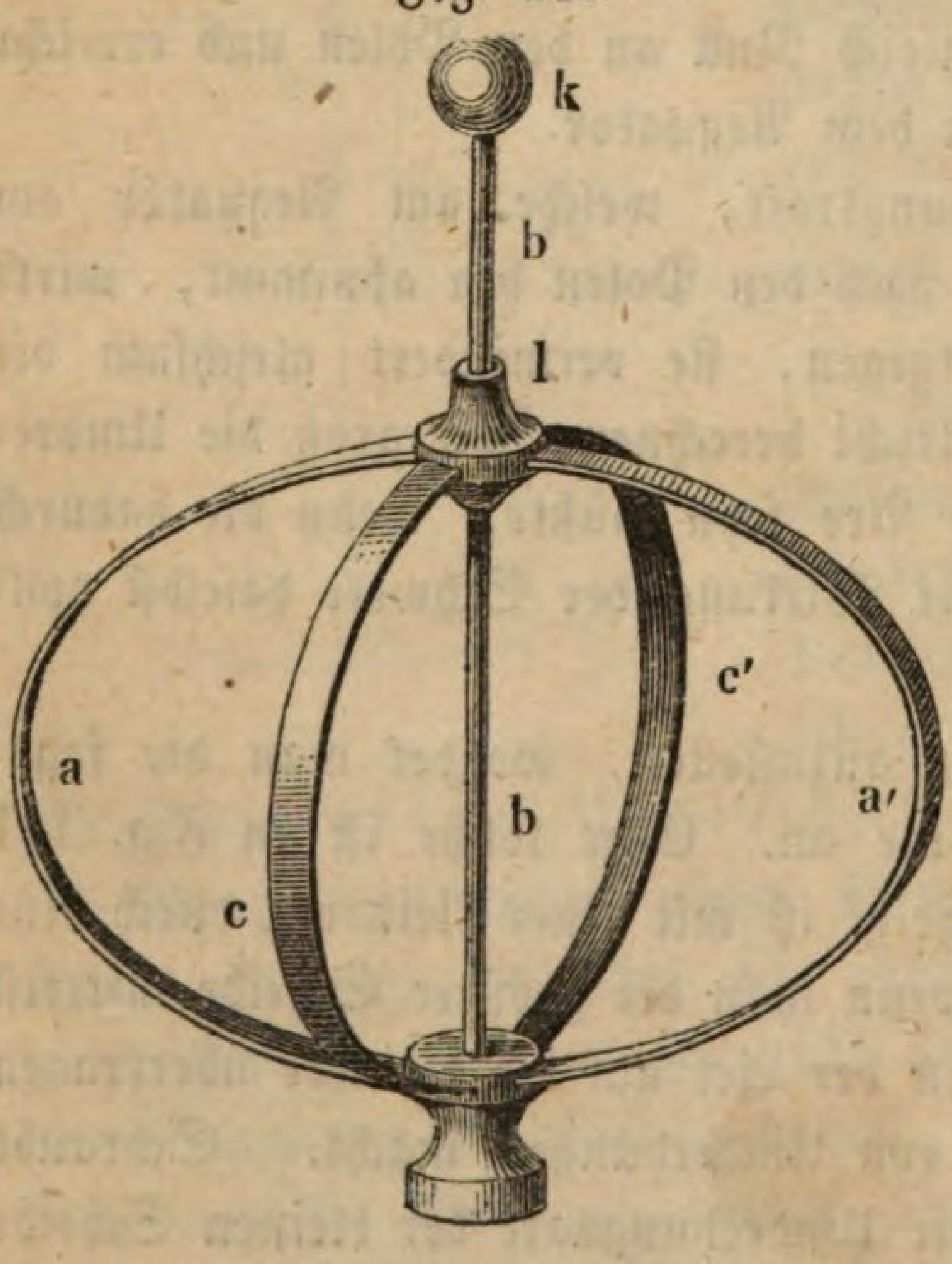
Unter verschiedenen Versuchen, die man mit der Schwungmaschine zur Erläuterung der Schwungkraft anstellen kann, wollen wir hier nur einige anführen.

Fig. 148.



Der Apparat, Fig. 148, sey mit der Hülse *a* auf den Zapfen *a* der Schwungmaschine angeschraubt. An einem horizontalen Metallstäbchen sind zwei Kugeln von Holz oder Elfenbein leicht verschiebbar angebracht, welche durch Schnüre so verbunden sind, daß sie nicht über eine gewisse Gränze von einander entfernt werden können. Wird der Apparat in rasche Rotation versetzt, so wird jede Kugel ein Bestreben haben, sich von der Umdrehungsare zu entfernen, aber sie können nicht auseinanderfahren, weil dies durch die Schnüre gehindert ist; diejenige Kugel, deren Schwungkraft größer ist, wird also die andere nach ihrer Seite hin nachziehen. Soll die Schwungkraft beider gleich seyn, soll also keine Bewegung entstehen, so muß die große Kugel in dem Verhältniß der Umdrehungsare näher stehen, als ihre Masse die der anderen übertrifft.

Fig. 149.



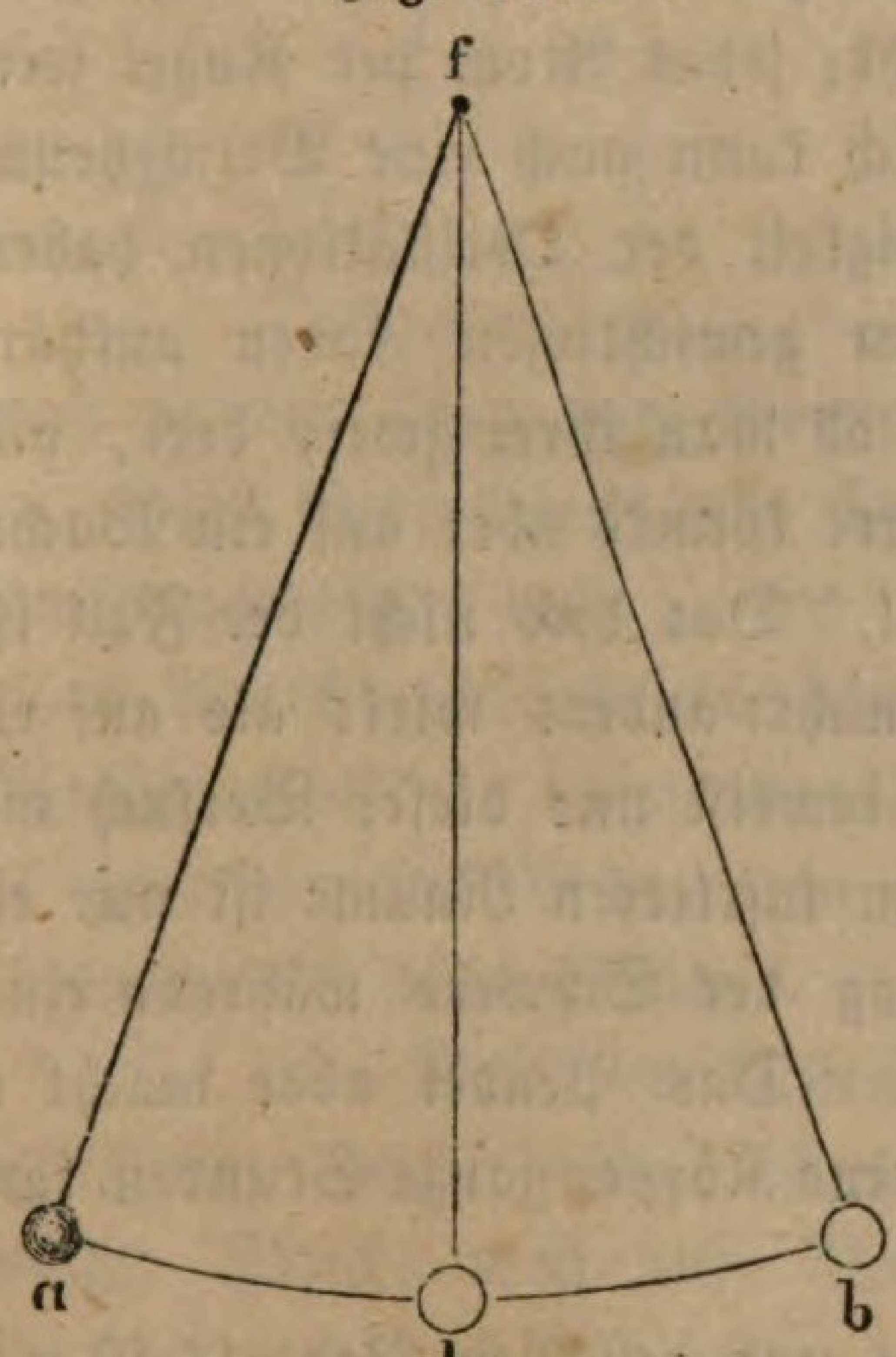
Der Apparat Fig. 149 dient, um die Abplattung der Erde zu erläutern. An dem unteren Ende der eisernen Are *b*, welche auf die Schwungmaschine aufgeschraubt wird, sind mehrere elastische Streifen *a*, *c*, *a'* *c'* von Messingblech befestigt, die oben wieder an einer Hülse *l* zusammenlaufen, welche leicht an der Are *b* hin- und hergeschoben werden kann. Im Zustand der Ruhe strecken sich die Federn *a*, *a'* *c* und *c'* so, daß die Hülse *l* an dem Knopfe *k* ansteht, sobald aber der Apparat rasch um die Are *b* rotirt,

nehmen die Metallstreifen die in der Figur angedeutete Gestalt an, indem alle Theilchen derselben sich möglichst weit von der Rotationsaxe zu entfernen streben. Je schneller die Umdrehung ist, desto mehr werden die Streifen gekrümmt, desto tiefer also die Hülse *l* herabgezogen.

Wenn das Gefäß in Fig. 146 mit Wasser gefüllt ist, so kann dies nicht ausfließen, selbst wenn seine Oeffnung nach unten gekehrt wird, sobald seine Umdrehungsgeschwindigkeit groß genug ist, daß die Schwungkraft (der Werth von *p* in Gleichung 1) S. 116) größer wird als die beschleunigende Kraft der Schwere.

Vom Pendel. Das gewöhnliche Pendel (Fig. 150) besteht aus einer 69
schweren Kugel, welche am Ende eines biegsamen Fadens aufgehängt ist. Bringt man die Kugel aus ihrer Gleichgewichtslage, d. h. bringt man das Pendel aus seiner vertikalen Stellung, so macht es, wenn man es losläßt, ohne ihm irgend einen Anstoß zu geben, Schwingungen, welche fortwährend in derselben Vertikalebene bleiben. Bringt man z. B. das Pendel in die Lage *f a*, so beschreibt die Kugel den Bogen *a l*, in *l* kommt sie mit solcher Geschwindigkeit an, daß sie auf der anderen Seite bis *b* steigt, d. h. zu der Höhe des Punktes *a*; vom Punkte *b* geht die Kugel abermals zurück, durchläuft in umgekehrter Richtung wieder den Bogen *b l a* und setzt auf dieselbe Weise seine Schwingungen fort. Beim Niedergange des Pendels nimmt seine Geschwindigkeit fortwährend zu, beim Aufsteigen nimmt sie ab, in dem Momente also, in welchem das Pendel die Gleichgewichtslage passirt, hat es seine größte Geschwindigkeit.

Fig. 150.



Der Winkel *a f l* heißt Ausschlagswinkel oder auch nur Ausschlag.

Die Bewegung von *a* bis *b* oder von *b* bis *a* heißt eine Oscillation; von *a* bis *l* ist eine halbe niedergehende, von *l* bis *b* eine halbe aufsteigende Oscillation.

Die Amplitude einer Oscillation ist die in Graden, Minuten und Secunden ausgedrückte Größe des Bogens *a b*.

Die Dauer einer Oscillation ist die Zeit, welche das Pendel nöthig hat, um diesen Bogen zu durchlaufen.

Nach dem ersten Anblicke sollte man aus den Versuchen schließen, daß die Bewegung eines Pendels immer fortdauern müßte, denn wenn es von *a* ausgehend auf der anderen Seite zu einer gleichen Höhe *b* ansteigt, so muß es von *b* ausgehend auch wieder bis *a* steigen, und es wird so denselben Weg zum zweiten, zum dritten Male u. s. w. bis ins Unendliche machen müssen.

Dieser Schluß würde ganz richtig seyn, wenn *b* wirklich absolut gleiche Höhe mit *a* hätte; aber die Reibung am Aufhängepunkte *f*, der Widerstand der Luft, welche die Kugel vor sich wegtreiben muß, machen es unmöglich, daß die Kugel genau wieder bis zu der Höhe steigt, von welcher sie herabfiel. Die Differenz wird freilich erst nach einer Reihe von Schwingungen merklich.

70 **Gesetze der Pendelschwingungen.** Die Gesetze der Schwingungen einfacher Pendel sind folgende:

1) Die Schwingungsdauer ist vom Gewichte der Kugel und von der Natur ihrer Substanz unabhängig.

Um dies zu beweisen, mache man mehrere Pendel von gleicher Länge, die Kugel des einen von Metall, die des anderen von Wachs, die des dritten von Holz u. s. w., und man wird finden, daß sie alle gleiche Schwingungsdauer haben.

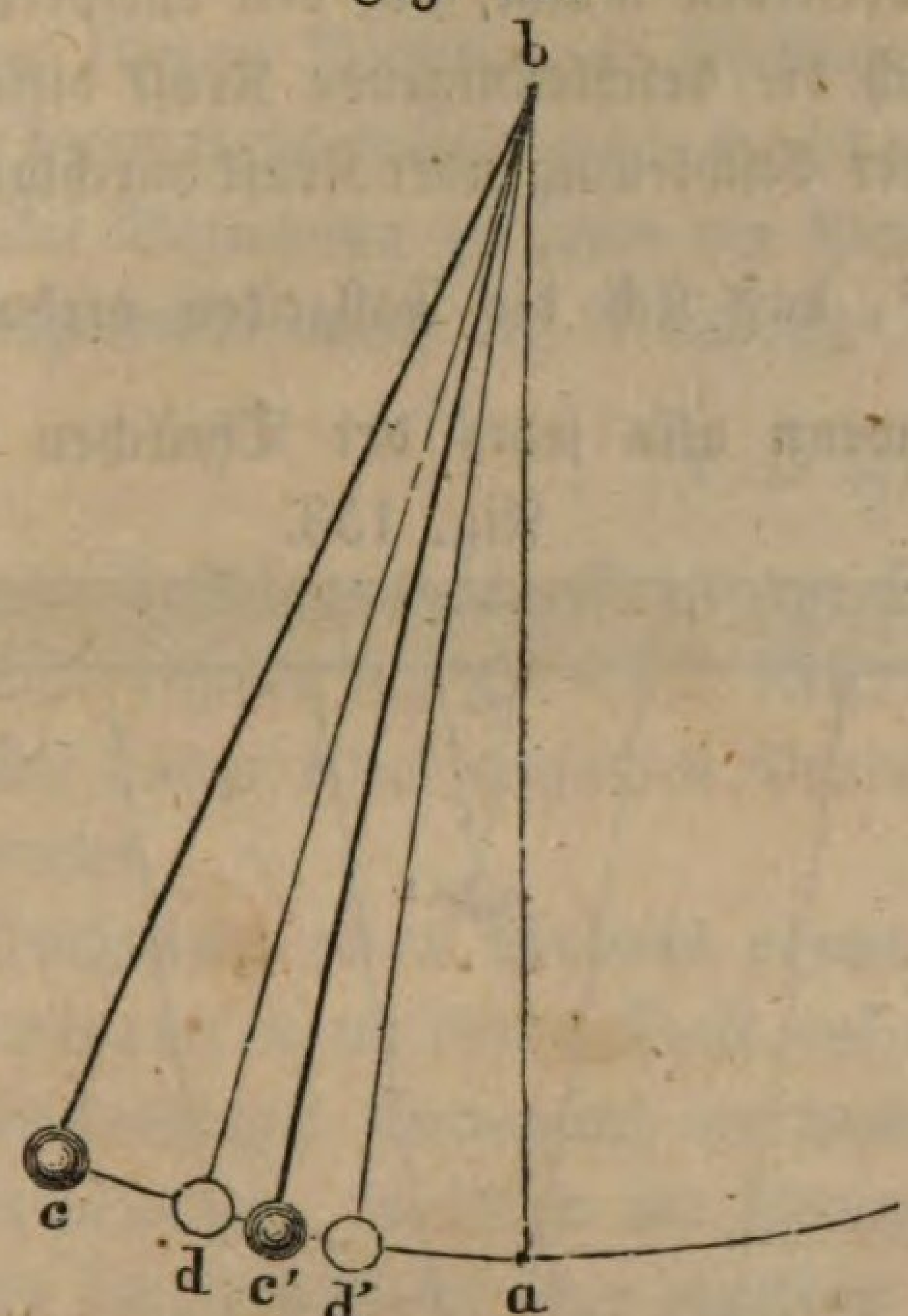
Wenn die Schwere ein Pendel oscilliren macht, so wirkt sie auf jedes Atom der Materie, aus welcher die Kugel besteht; jedes Atom der Kugel wird durch seine eigene Schwere getrieben, und folglich kann auch eine Vermehrung der Atome keinen Einfluß auf die Geschwindigkeit der Oscillationen haben. Könnte man ein einziges Atom Eisen an einem gewichtlosen Faden aufhängen, so muß es gerade so schnell oscilliren, als ob man ihrer zwei, drei, vier oder eine Kugel von Eisen anhängt. Die Schwere könnte aber auf ein Wachsmolekül anders wirken als auf ein Eisenmolekül. Daß dies nicht der Fall ist, daß die Schwere auf ein Molekül von Eisen nicht anders wirkt als auf ein Molekül von Gold, Platin, Wachs u. s. w., beweist uns dieser Versuch mit dem Pendel. Der oben erwähnte Fallversuch im luftleeren Raume ist nur ein roher Versuch, weil wir hier nur die Wirkung der Schwere während einer außerordentlich kurzen Zeit beobachten können. Das Pendel aber macht es möglich, die Wirkung der Schwere auf verschiedene Körper ganze Stunden lang zu beobachten.

2) Die Dauer kleiner Oscillationen eines und desselben Pendels ist von der Größe der Schwingungen unabhängig. Wenn z. B. ein Pendel mit einer Amplitude von 4—5° schwingt, so ist die Schwingungsdauer dieselbe, als ob die Ausweichung nur 1° betrüge.

Dies Gesetz läßt sich folgendermaßen entwickeln. Wenn der Ausweichungswinkel nicht gar zu groß ist, so ist die Neigung der Bahn gegen die Horizontale der Entfernung von der Gleichgewichtslage proportional. Denken wir uns z. B. in *c*, Fig. 151, eine Tangente an den Kreisbogen gelegt, so macht sie mit der Horizontalen einen Winkel, welcher doppelt so groß ist als derjenige, welchen eine in *c'* an die Kreisbahn gezogene Tangente mit der Horizontalen macht, vorausgesetzt, daß der Bogen *c' a* halb so groß ist als der Bogen *c a*; wenn also das Pendel in *c* seine Bewegung beginnt, so ist die beschleunigende Kraft doppelt so groß, als wenn es von *c'* seinen Niedergang beginnt, der Bogen *c d*, den wir so klein annehmen wollen, daß wir ihn als geradlinig betrachten können, und der Bogen *c' d'*, welcher nur halb so groß ist, werden also

in gleichen Zeiten durchlaufen, wenn die Bewegung einmal in *c*, ein andermal in *c'* beginnt.

Fig. 151.



Denken wir uns an einer Axe zwei gleiche Pendel aufgehängt, das eine bis *c*, das andere bis *c'* gehoben und gleichzeitig losgelassen, so werden sie gleichzeitig in den Punkten *d* und *d'* ankommen. Die beschleunigende Kraft in *d* ist aber doppelt so groß als in *d'*, außerdem aber langt das eine Pendel in *d* mit einer Geschwindigkeit an, welche doppelt so groß als diejenige ist, mit welcher das andere den Punkt *d'* passirt, und daraus folgt denn, daß in dem nächsten kleinen Zeittheilchen das eine Pendel einen doppelt so großen Weg zurücklegt als das andere. Auf diese Weise fortschließend, findet man endlich, daß beide Pendel gleichzeitig in *a* ankommen müssen.

Diese Schlußweise läßt sich auch noch anwenden, wenn das Verhältniß der Ausschlagswinkel nicht gerade das von 1 zu 2, sondern ein anderes ist, weil für kleine Ausschlagswinkel die beschleunigende Kraft stets der Entfernung von der Gleichgewichtslage proportional ist; und so läßt sich allgemein zeigen, daß bis zu einer gewissen Gränze hin die Schwingungsdauer von der Größe der Ausschlagswinkel nicht abhängt.

Um dies Gesetz durch den Versuch zu bestätigen, muß man die Zeit genau bestimmen, welche nöthig ist, damit ein Pendel mehrere hundert Schwingungen macht. Macht man diese Beobachtung zu Anfang der Bewegung, wenn die Amplitude $4-5^{0}$ ist, später, wenn sie nur noch $2-3^{0}$ beträgt, und zuletzt, wenn die Oscillationen so klein geworden sind, daß man sie mit der Lupe beobachten muß, so findet man, daß die Oscillationen in diesen drei Stadien wirklich isochron sind.

3) Die Schwingungsdauer zweier ungleich langer Pendel verhält sich wie die Quadratwurzel aus den Pendellängen.

Man denke sich den Schwingungsbogen *ab* eines Pendels in so viel gleiche Theile getheilt, daß man jedes dieser Bogentheilchen als geradlinig betrachten kann. Wenn nun der Ausschlagswinkel eines längeren Pendels eben so groß ist, so muß sich der Schwingungsbogen *cd*, Fig. 152 a. f. S., zum Schwingungsbogen *ab* verhalten wie die Pendellängen. Denken wir uns den Bogen *dc* in eben so viel gleiche Theile getheilt wie den Bogen *ab*, so werden auch die einzelnen Theile im Verhältniß der Pendellängen stehen. Wenn also das eine Pendel 4mal so lang ist als das andere, so werden auch jene Unterabtheilungen des Bogens *dc* 4mal so groß seyn als die entsprechenden Theile des Bogens *ab*.

Der Winkel, welchen das oberste, das zweite, dritte u. s. w. Bogentheilchen von *ab* mit der Horizontalen macht, ist gleich dem Winkel, welchen das erste, zweite, dritte u. s. w. Bogentheilchen von *cd* mit derselben macht, auf den entsprechenden Theilen von *ab* und *cd* ist demnach auch die beschleunigende Kraft dieselbe.

Wenn aber verschiedene Wege mit gleicher beschleunigender Kraft durchlaufen werden, so lehrt uns die Formel $s = \frac{g}{2} t^2$, daß sich die Fallzeiten verhalten wie die Quadratwurzeln der Fallräume; wenn also jedes der Theilchen von

Fig. 152.

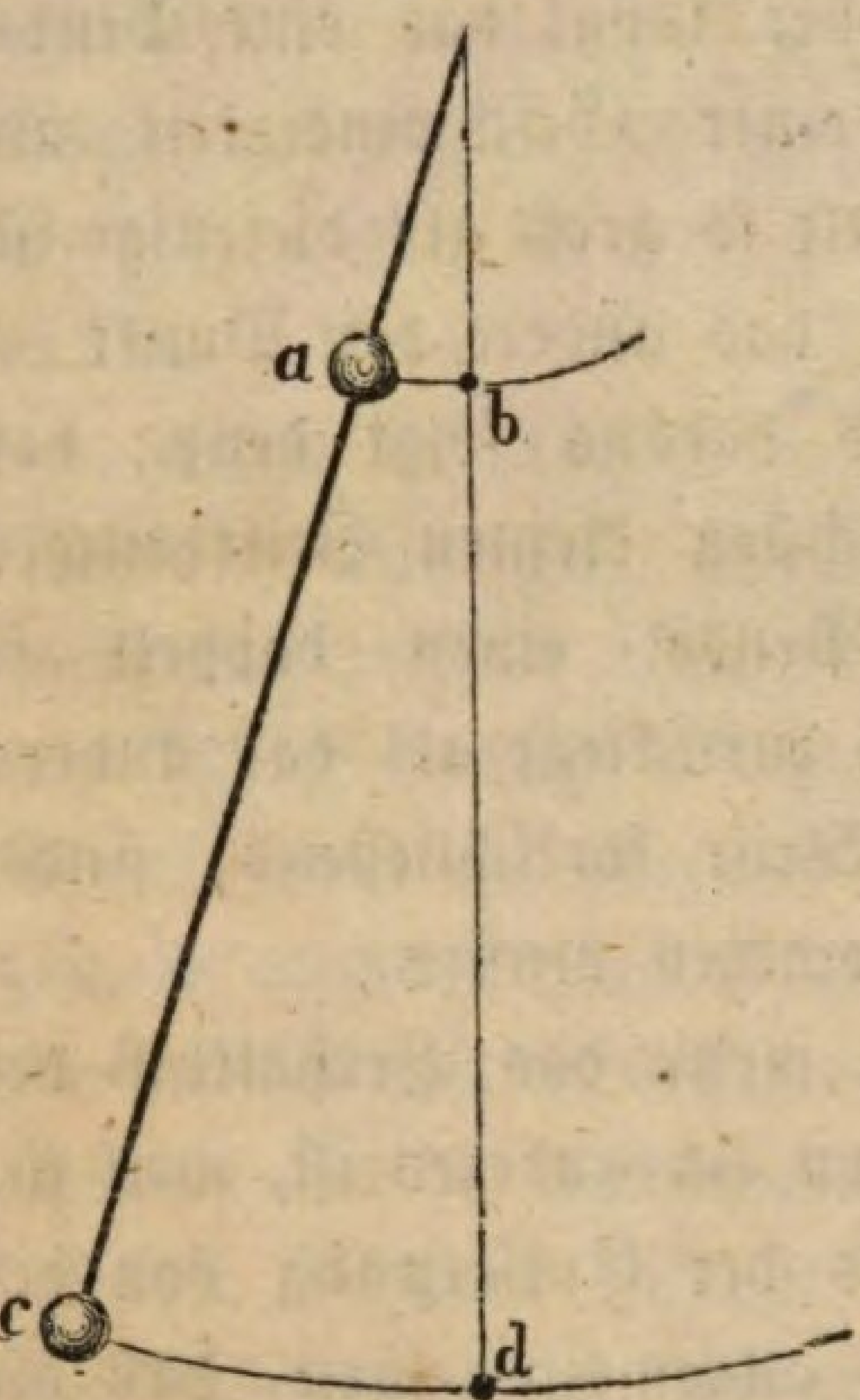
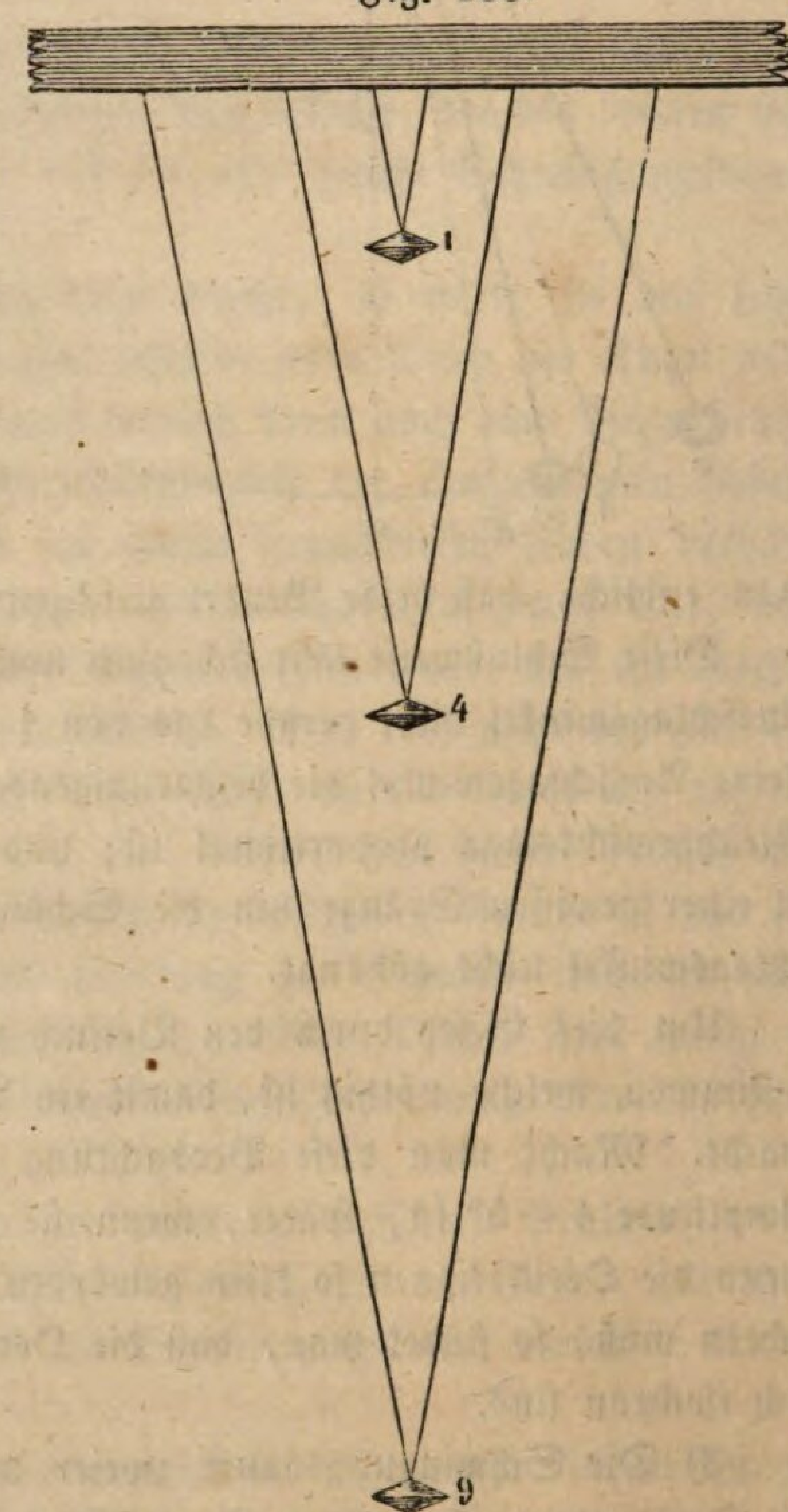


Fig. 153.



cd 2=, 3=, 4=, *n*mal so groß ist als das entsprechende Theilchen von *ab*, so wird die Zeit, in welcher ein Theilchen von *cd* durchfallen wird, auch $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, $\sqrt{4}$, $\sqrt{n}$mal so groß seyn als die, in welcher das entsprechende Theilchen von *ab* durchlaufen wird. Da dies aber für alle Theilchen gilt, so gilt sie auch für ihre Summe, was denn mit anderen Worten heißt, die Schwingungsdauer ist der Quadratwurzel aus der Pendellänge proportional.

Um die Richtigkeit des dritten Gesetzes durch den Versuch nachzuweisen, nehme man drei Pendel von verschiedener Länge. Wenn sich z. B. die Pendellängen wie die Zahlen 1, 4, 9 verhalten, so verhalten sich die entsprechenden

Schwingungszeiten wie die Zahlen 1, 2, 3. Am bequemsten hängt man zu diesem Versuche die Kugeln an einem doppelten Faden auf, wie Fig. 153 zeigt. Während ein Pendel, dessen Länge 4 Fuß ist, eine Oscillation macht, macht das viermal kürzere Pendel zwei Oscillationen; und während ein Pendel von 1 Fuß Länge dreimal hin und her geht, macht ein 9 Fuß langes nur einen Hin- und Hergang.

Die Beziehung zwischen der Pendellänge l und der Schwingungsdauer t ist ausgedrückt durch die Gleichung

$$t = 3{,}14 \sqrt{\frac{l}{g}}$$

wo g die beschleunigende Kraft der Schwere bezeichnet. Aus genauen Pendelversuchen ergiebt sich $g = 9{,}8$ Meter.

Die Länge eines einfachen Pendels, welches Secunden schlägt, beträgt 994 Millimeter.

Leistung oder Arbeit einer Kraft. Wenn eine beschleunigende, d. h. 71
eine fortdauernd wirkende Kraft auf einen Körper wirkt, so wird sie demselben eine beschleunigte Bewegung mittheilen, seine Geschwindigkeit nimmt der Zeit proportional zu, so lange der Bewegung des Körpers entweder gar keine Hindernisse entgegenstehen, oder dieselben doch der beschleunigenden Kraft noch nicht das Gleichgewicht halten.

Halten sich im Zustand der Bewegung Kraft und Widerstand das Gleichgewicht, so wird eine gleichmäßige Bewegung stattfinden; die Arbeit, die Leistung der Kraft besteht eben in der Ueberwindung dieses Widerstandes.

Auf der einen Seite der Rolle der Fallmaschine (S. 109) hänge das Gewicht m, auf der anderen $m + r$, d. h. außer m noch ein Gewicht r, welches gerade hinreicht, der Reibung an der Rolle das Gleichgewicht zu halten. Durch Auflegung eines Uebergewichts auf der Seite von $m + r$ wird nun eine beschleunigte Bewegung eingeleitet, welche von dem Augenblicke an, wo das Uebergewicht weggenommen wird, in eine gleichförmige übergeht; jetzt findet ein Gleichgewichtszustand Statt, die Arbeit des niedersinkenden Gewichtes $m + r$ auf der einen Seite besteht nun darin, das Gewicht m auf der anderen Seite zu heben und die Axenreibung zu überwinden.

Wenn eine Locomotive auf ebener Eisenbahn mit gleichmäßiger Geschwindigkeit einen Wagenzug fortführt, so besteht die Arbeit der Kraft in der Ueberwindung der Reibungswiderstände, welche an allen einzelnen Wagen stattfinden.

Wenn ein Arbeiter, an einem Haspel arbeitend, einen Stein hebt, so besteht seine Arbeit in der Ueberwindung der Schwere des Steins und des Reibungswiderstandes um die Axe der Welle.

Beim Zermahlen des Getreides besteht die Arbeit in der Ueberwindung der Cohäsionskraft desselben.

Bei der Leistung einer Kraft kommen zweierlei Dinge in Betracht, 1) die Größe des Widerstandes, welcher überwunden werden soll, und 2) die Länge des Weges, auf welchem der Widerstand in jeder Zeiteinheit überwunden werden muß. Bei der Hebung von Lasten kommt es also darauf an, wie groß das

Gewicht der zu hebenden Masse ist und wie hoch sie gehoben werden soll. Um die Kraft zu kennen, welche nöthig ist, um ein Fuhrwerk auf ebener Straße fortzuziehen, muß man die Größe des Reibungswiderstandes und die Länge des Weges kennen, welche in jeder Secunde zurückzulegen ist.

Bezeichnet man mit W die Leistung oder Arbeit einer Kraft, so ist sie gleich dem Product, welches man erhält, wenn man die Größe der constant wirkenden Kraft K, welche dem Widerstand das Gleichgewicht hält, mit dem in der Zeiteinheit zurückgelegten Weg S multiplicirt, es ist also $W = KS$.

Um die verschiedenen mechanischen Leistungen der Kräfte mit einander vergleichen zu können, muß man sie auf eine bestimmte Einheit beziehen; die zu überwindenden Widerstände vergleicht man deshalb mit der Hebung der Lasten und nimmt als Einheit der Kraftwirkung die vertikale Hebung der Gewichtseinheit um die Längeneinheit.

Legt man das neufranzösische Maßsystem zu Grunde, so ist die Einheit der mechanischen Kraftwirkung das Kilogrammometer, d. h. die Hebung einer Last von 1 Kilogramm auf die Höhe von 1 Meter. Legt man Fuß und Pfund als Längen- und Gewichtseinheit zu Grunde, so ist das Fußpfund die Einheit, nach welchem man die Leistung einer Kraft schätzt.

Ein Mann z. B., welcher eine Last von 1 Centner auf eine Höhe von 70 Fuß hinaufträgt, hat eine mechanische Arbeit verrichtet, welche gleich $70 \times 100 = 7000$ Fußpfund ist.

1 Kilogrammometer ist gleich 6,8 Fußpfund rheinländ.

Um die mechanische Arbeit gehörig zu bestimmen, muß auch angegeben werden, in welcher Zeit eine Arbeit verrichtet wird.

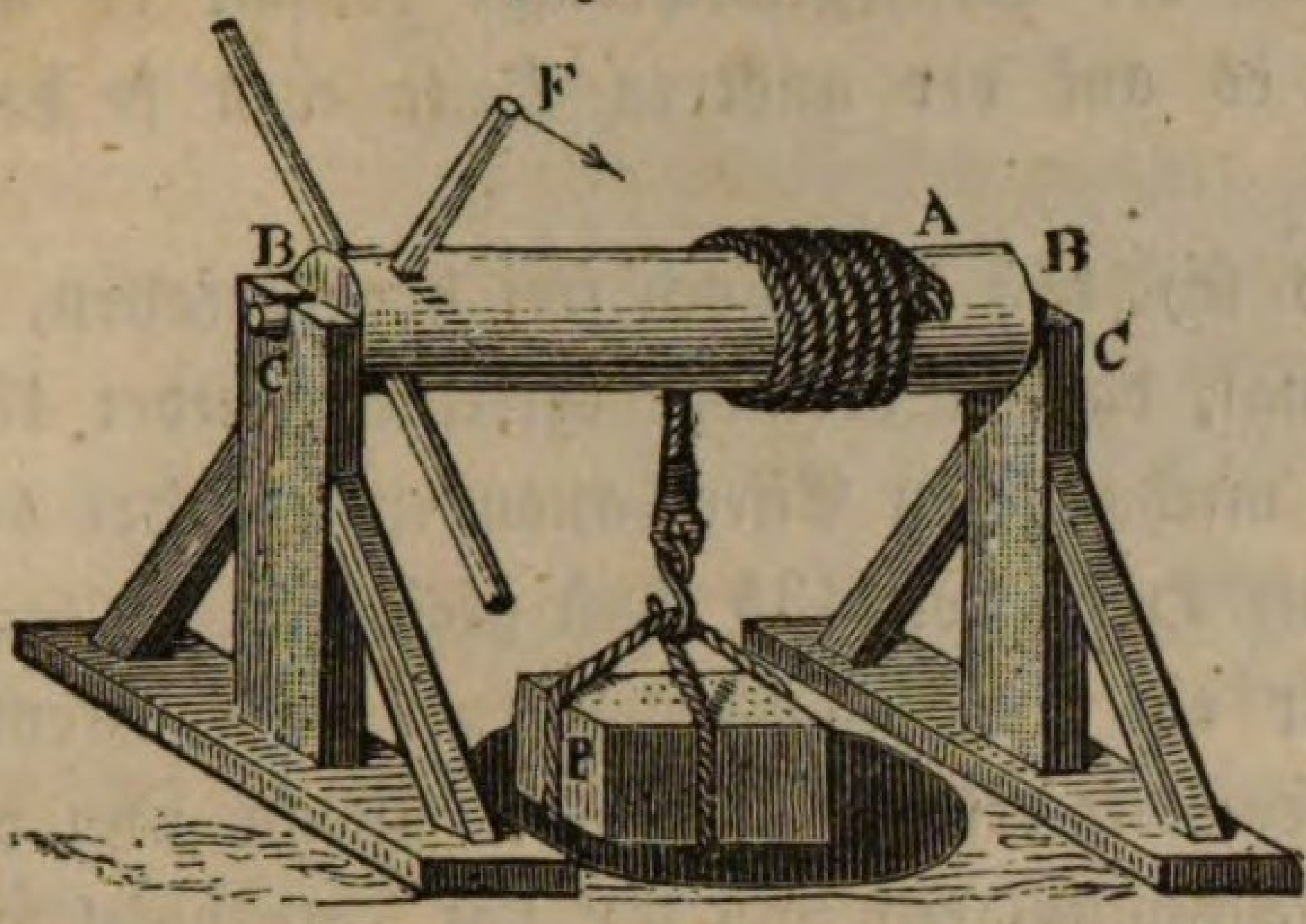
Im Durchschnitt kann ein Pferd eine Arbeit verrichten, welche gleich 75 Kilogrammometer (75 Kilometer) per Secunde ist. Nach englischem Maaß ist eine solche Pferdekraft 542, nach preußischem Maaß 510 Fußpfund in der Secunde. Wenn man sagt, eine Dampfmaschine, ein Wasserrad oder irgend ein anderer Motor übe eine Kraft von 6 Pferdekräften aus, so heißt das, er verrichte per Secunde eine Arbeit von 6×75 Kilogrammometer, d. h. sämmtliche Widerstände, welche bei Umdrehung der Maschinenaxe überwunden werden müssen, sind gerade so groß, als ob durch die Umdrehung dieser Axen in jeder Sekunde eine Last von 6×75 Kilogrammen 1 Meter hoch gehoben werden sollte.

Der Nutzeffect einer Kraft, welcher an einer mechanischen Potenz, etwa an einem Haspel, einem Flaschenzug, einer Schraube wirkt, wird durch eine solche Maschine in keinerlei Weise vergrößert, d. h. die mechanische Arbeit, welche man mit Hülfe der Maschinen vollbringt, ist durchaus nicht größer als diejenige, welche die an der Maschine wirkende Kraft unmittelbar verrichtet.

An einem Seile z. B., welches um eine einfache Rolle geschlungen ist, läßt sich bequem eine Last von 25 Pfunden um $2\frac{1}{2}$ Fuß in der Secunde heben, also eine mechanische Arbeit von 62,5 Fußpfund per Secunde verrichten. Hängt aber die Last an einem Wellbaum, Fig. 154, dessen Radius 4mal kleiner ist,

als der Hebelarm *Fc*, an welchen der Arbeiter angreift, so würde man zwar mit derselben Kraftanstrengung eine vierfache Last, jedoch auch mit 4mal geringerer Geschwindigkeit heben können; drückt der Arbeiter an dem Hebel mit einer Kraft von 25 Pfund und legt er, mit der Hand diesen Druck ausübend, in jeder Secunde einen Weg von 2,5 Fuß zurück, verrichtet er also eine mechansiche Arbeit von 62,5 Fußpfund, so wird dadurch der 100 Pfund schwere Stein in jeder Secunde um $\frac{2,5}{4}$, also 0,625 Fuß hoch gehoben, der Nutzeffect ist also $100 \times 0,625 = 62,5$ Fußpfund, mithin gleich der mechanischen Arbeit, welche die Kraft unmittelbar verrichtet. Untersuchen wir die Wirkungsweise anderer Maschinen, der Schraube, des Flaschenzuges, der verschiedenen Räderwerke, so werden wir stets zu demselben Resultate gelangen, daß, was man auf der einen Seite an Kraft gewinnt, auf der anderen Seite an Geschwindigkeit verloren geht, daß also die mechanische Arbeit durch Maschinen durchaus nicht vermehrt wird.

Fig. 154.



Der Nutzeffect einer Maschine kann also **höchstens** der mechanischen Arbeit gleich seyn, welche die Kraft unmittelbar hervorzubringen im Stande ist. In der Praxis wird aber ein solcher Nutzeffect nie erreicht, weil immer ein Theil der Kraft zur Ueberwindung von Reibungswiderständen in der Maschine verbraucht wird, also für den Nutzeffect verloren geht. Die Maschinen dienen daher nur, um die Art der Bewegung zu verwandeln, nicht aber um den Nutzeffect zu vergrößern.

Lebendige Kraft. Wenn ein Körper in Bewegung ist, so kommt er 72
nur dadurch zur Ruhe, daß äußere Kräfte dieser Bewegung einen Widerstand leisten, ein bewegter Körper kann also gewissermaßen als ein Kraftmagazin betrachtet werden, denn indem allmälig seine Geschwindigkeit abnimmt, überwindet er bald mehr bald weniger Widerstände, je nachdem seine Masse und seine Geschwindigkeit größer oder kleiner war.

Wenn ein bewegter Körper einen gleichmäßig wirkenden Widerstand zu überwinden hat, wird er einen größeren oder kleineren Weg noch zurücklegen, ehe er zur Ruhe kommt, je nachdem der zu überwindende Widerstand groß oder klein ist. Um nun die Wirkungsfähigkeit eines bewegten Körpers zu messen, muß man also einen bestimmten Widerstand als Einheit annehmen und als solche nimmt man den Widerstand, den seine Schwere dem vertikalen Aufsteigen entgegensetzt.

Wenn ein Körper von einer gewissen Höhe herabgefallen ist, so erlangt er dadurch eine solche Geschwindigkeit, daß wenn er mit dieser Geschwindigkeit

vertikal aufwärts geworfen würde, er bis zu derselben Höhe stiege, von welcher er herabgefallen ist.

Darauf beruht ja das Pendel; in der Gleichgewichtslage kommt es mit einer solchen Geschwindigkeit an, daß es auf der anderen Seite eben so hoch steigt, als es zuvor herabgefallen war.

Gesetzt, eine Kugel von 6 Pfund sey 135 Fuß hoch frei herabgefallen, so hat sie eine solche Geschwindigkeit erlangt, daß sie vermöge derselben wieder 135 Fuß steigen würde, sie kann also einen mechanischen Effect ausüben, welcher der Hebung einer Last von 6 Pfund auf die Höhe von 135 Fuß gleich ist.

Den Fallraum von 135′ durchläuft ein frei fallender Körper in 3 Secunden; die Geschwindigkeit, die er in dieser Zeit erlangt, ist 90′. Wenn nun die Kugel von 6 Pfund überhaupt eine Geschwindigkeit von 90′ hat, gleichviel auf welche Weise sie dieselbe erlangte, so kann sie vermöge dieser Geschwindigkeit einen mechanischen Effect ausüben, welcher der Hebung von 6 Pfund auf die Höhe von 135′ gleich ist.

Man nennt **lebendige Kraft** eines in Bewegung begriffenen Körpers **das Product seiner Masse in die Höhe, zu welcher er, vermöge seiner Geschwindigkeit, vertikal aufsteigen würde.**

In dem eben besprochenen Beispiel ist also 6 × 135 = 810 Fußpfund die lebendige Kraft der 6pfündigen Kugel, welche 90′ Geschwindigkeit hat.

Nach den Beziehungen zwischen Fallraum und Geschwindigkeit, welche wir oben (S. 111) kennen lernten, ist

$$s = \frac{v^2}{2g},$$

wenn s den Fallraum, v die zugehörige Geschwindigkeit und g die Endgeschwindigkeit der ersten Fallsecunde bezeichnet; wenn ein Körper von der Masse M die Geschwindigkeit v hat, so ist demnach seine lebendige Kraft W

$$W = Ms = M\frac{v^2}{2g}.$$

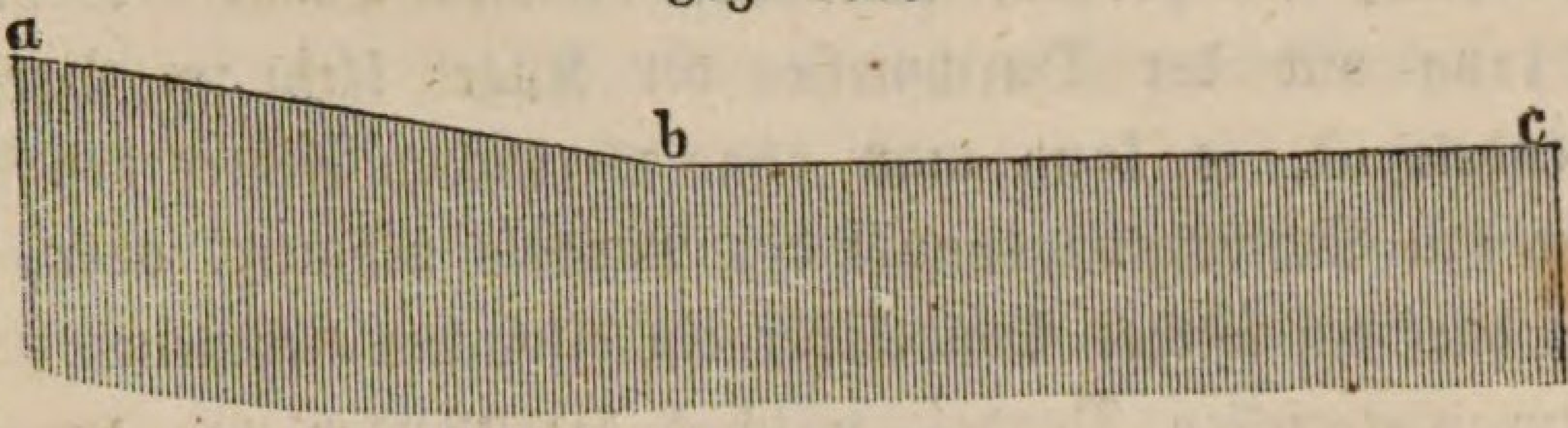
Die lebendige Kraft eines Körpers ist dem Quadrat seiner Geschwindigkeit proportional.

Weiß man, wie hoch ein Körper, der eine bestimmte Geschwindigkeit hat, vermöge derselben vertikal aufsteigen würde, so kann man leicht berechnen, wie weit er sich noch fortbewegen würde, wenn ein größerer oder kleinerer Widerstand als der seiner Schwerkraft zu überwinden ist; in demselben Verhältniß, in welchem der Widerstand geringer ist, wird der noch zu durchlaufende Weg größer.

Eine Eisenbahn bilde z. B. von a bis b eine schiefe Ebene, von b bis c aber laufe sie horizontal fort. Ein einzelner Wagen komme auf der schiefen Ebene herabrollend bei b mit einer Geschwindigkeit von 30′ in der Secunde an, so ist leicht zu berechnen, wie weit er noch auf der horizontalen Bahn fortrollen wird, ehe er zur Ruhe kommt, wenn die Reibung $^1/_{300}$ der Last ist. Nach der

Formel $s = \frac{v^2}{2g}$ ist die Höhe, zu welcher er vermöge der Geschwindigkeit von

Fig 155.



30′ vertikal aufsteigen würde $s = \frac{900}{60} = 15'$, der Widerstand der Reibung, welcher beim Fortrollen auf der Bahn überwunden werden muß, ist aber 300mal geringer als derjenige, welchen die Schwere dem vertikalen Aufsteigen entgegensetzt, der Wagen wird also noch 15 × 300 = 4500′ fortlaufen, ehe er zur Ruhe kommt.

Das materielle Pendel. Die oben entwickelten Pendelgesetze gelten strenge genommen nur für ein ideales Pendel. Ein solches Pendel kann man sich wohl vorstellen, aber nicht construiren, denn es müßte aus einem einfachen Faden ohne alles Gewicht bestehen, und an seinem Ende dürfte sich nur ein schwerer Punkt befinden.

Fig. 156.



Jedes Pendel, welches diesen beiden Forderungen nicht entspricht, ist ein zusammengesetztes Pendel. Ein gewichtloser und unbiegsamer Faden also, an welchem sich nur zwei schwere Moleküle *m* und *n* befinden, würde demnach schon ein zusammengesetztes Pendel seyn. Das Molekül *m*, welches dem Aufhängepunkte näher ist als *n*, hat ein Bestreben, schneller zu schwingen; weil aber die beiden Moleküle verbunden sind, so wird *m* die Bewegung von *n* beschleunigen, und umgekehrt wird *n* die Bewegung von *m* verzögern, die Schwingungen werden deshalb mit einer Geschwindigkeit vor sich gehen, welche zwischen den Geschwindigkeiten liegt, mit welchen jedes der Moleküle *m* und *n* für sich allein schwingen würde. Sie sind gleich den Schwingungen eines einfachen Pendels, welches länger als *fm* und kürzer als *fn* ist. Eben so verhält es sich mit jedem materiellen Pendel. Diejenigen Theile des Pendels nämlich, welche dem Schwingungsmittelpunkte am nächsten liegen, sind in ihrer Bewegung durch die entfernteren verzögert, die entfernteren aber durch die näheren beschleunigt. Es muß demnach auch in jedem zusammengesetzten Pendel einen Punkt geben, welcher durch die übrige Masse des Pendels weder beschleunigt, noch verzögert ist, welcher gerade so schnell schwingt wie ein einfaches Pendel, dessen Länge seiner Entfernung vom Aufhängepunkte gleich ist. Dieser Punkt heißt **Schwingungspunkt**, centrum oscillationis. Wenn man von der Länge eines zusammengesetzten Pendels spricht, so versteht man darunter die Entfernung dieses Punktes vom Aufhängepunkte oder, was dasselbe ist, die Länge eines einfachen Pendels von gleicher Schwingungsdauer.

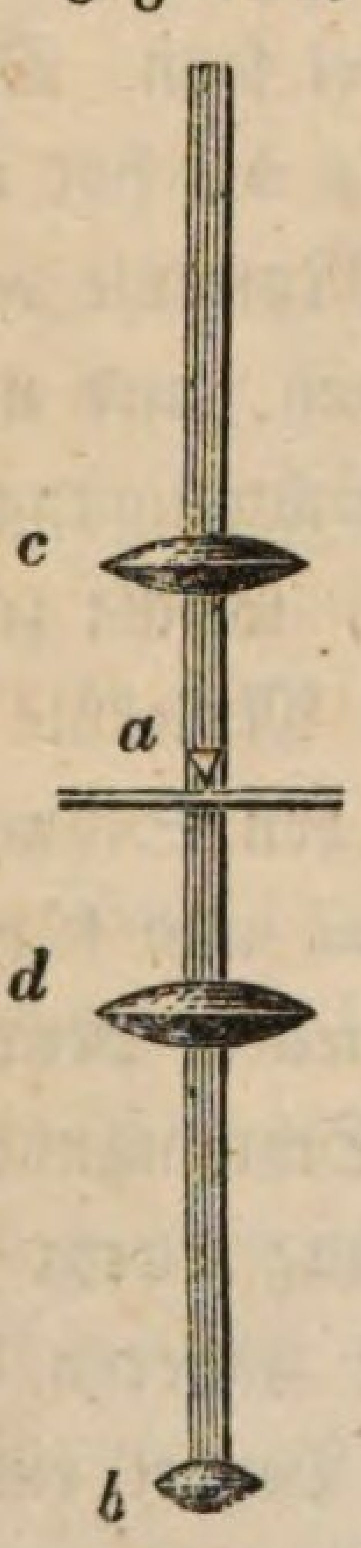
Am meisten nähert sich dem einfachen Pendel ein solches, welches aus einem dünnen Faden besteht, an dessen unterem Ende eine Kugel oder ein Doppelkegel einer Substanz von großem specifischen Gewicht hängt. Wenn der Faden einigermaßen lang und der Durchmesser der Kugel klein im Verhältnisse zur Länge des Pendels ist, so kann man ohne merklichen Fehler den Schwerpunkt der Kugel für den Schwingungspunkt des Pendels nehmen, oder, mit anderen Worten, man darf ein solches Pendel für ein einfaches nehmen.

Bei jedem materiellen Pendel, welches bedeutender von der Form eines einfachen Pendels abweicht, ist jedoch der Schwerpunkt durchaus nicht mehr der Schwingungspunkt; wo aber der Schwingungspunkt eines materiellen Pendels liege, durch Rechnung zu finden, ist in den meisten Fällen eine schwierige Aufgabe, weil man bei dieser Rechnung nicht allein die beschleunigende Kraft der Schwere der einzelnen in verschiedenen Entfernungen vom Drehpunkte liegenden materiellen Theilchen, sondern auch den Widerstand berücksichtigen muß, welchen sie vermöge der Trägheit ihrer Masse einer Beschleunigung entgegensetzen.

Daß der Schwingungspunkt eines materiellen Pendels nicht mit seinem Schwerpunkt zusammenfallen kann, ergiebt sich am einfachsten aus der Betrachtung eines solchen Pendels, bei welchem ein Theil der Masse über dem Aufhängepunkte sich befindet. Ein solches Pendel schwingt bedeutend langsamer, als es schwingen würde, wenn sein Schwerpunkt der Schwingungspunkt wäre.

Fig. 157 stellt einen geraden eingetheilten Stab vor, welcher in der Mitte

Fig. 157.



mit einer Schneide versehen ist, wie die, welche den Drehpunkt eines Wagbalkens bildet. Wenn man nun 1 Decimeter weit unter und über dieser Schneide eine Bleilinse, z. B. jede 2 Pfd. schwer, befestigt und die Schneide auf ihre Unterlage aufsetzt, so ist die Stange mit ihren Linsen im Zustande des indifferenten Gleichgewichts, denn der Schwerpunkt des Systems fällt mit dem Drehpunkte zusammen; sobald man aber am unteren Ende des Stabes ein kleines Uebergewicht anbringt, so ist das Ganze ein Pendel. Die Schwingungen dieses Pendels sind aber ungleich langsamer als die Schwingungen eines einfachen Pendels von der Länge *a b*, denn die einzige Kraft, welche das ganze System in Bewegung setzt, ist die Schwere des unteren Bleigewichts, diese hat aber nicht allein ihre eigene Masse in Bewegung zu setzen, wie es bei einem einfachen Pendel der Fall gewesen wäre, sondern sie hat auch noch die Massen der Linsen bei *c* und *d* zu bewegen.

Es erklärt sich dadurch, warum ein Wagbalken, den man ebenfalls als ein Pendel betrachten kann, so langsam schwingt, obgleich sich sein Schwerpunkt ganz nahe unter dem Aufhängepunkte befindet, er also sehr schnell schwingen müßte, wenn der Schwerpunkt wirklich der Schwingungspunkt wäre.

74 **Die Pendeluhr.** Die wichtigste Anwendung, die man vom Pendel gemacht hat, ist die Regulirung der Uhren. In jeder Uhr muß eine beschleuni-

gende Kraft wirken, um die Bewegung hervorzubringen und zu erhalten. Nun aber ist aus dem, was über beschleunigende Kräfte gesagt wurde, klar, daß, wenn der beschleunigenden Kraft nicht eine andere gleiche Kraft oder ein Bewegungshinderniß entgegenwirkt, die Bewegung nicht gleichförmig bleiben kann, sondern daß sie, wie bei einem fallenden Körper, schneller und schneller wird. Bei unseren Wanduhren wird die beschleunigende Kraft durch Gewichte hervorgebracht, welche an einer Schnur hängen, die um eine horizontale Axe geschlungen ist. Wenn das Gewicht durch seine Schwere herabgezogen wird, wird durch die Schnur die Axe umgedreht und dadurch das ganze Uhrwerk in Bewegung gesetzt. Die Bewegung eines fallenden Gewichtes ist aber eine beschleunigte, folglich würde auch die Uhr anfangs langsam, dann schneller und schneller gehen müssen, wenn ihr Gang nicht regulirt würde, und diese Regulirung wird nun durch das Pendel bewerkstelligt.

Wie das Pendel den Gang einer Uhr reguliren könne, ist aus Fig. 158 a. f. S. ersichtlich. An der Axe, um welche die Schnur mit dem Gewichte angebracht ist, ist ein gezahntes Rad befestigt. Ueber diesem Rade befindet sich nun ein Anker *A C B*, welcher je nach seiner Stellung bald auf der einen, bald auf der anderen Seite in die Zähne des Rades eingreift. Dieser Anker wird durch die Schwingungen des Pendels hin und her geführt.

Die Figur stellt das Pendel gerade in der Lage vor, wo es seine äußerste Stellung links hat. Das Rad, welches durch das Gewicht von der Linken zur Rechten gedreht wird, kann aber nicht vorangehen, weil der Zahn *a* durch den Arm *B* des Ankers aufgehalten wird; sobald aber das Pendel zurückgeht, geht *B* auf die Seite, der Zahn *a* wird nun vorbeigelassen; die Bewegung des Rades wird aber doch alsbald wieder gehemmt, weil nun auf der anderen Seite der Arm *A* des Ankers niedergeht und an diesen dann der Zahn *b* des Rades anstößt.

Geht nun das Pendel abermals nach der Linken, so wird nun der Zahn *c* durch *B* angehalten. Bei jedem Hin- und Hergange geht also das Rad um einen Zahn weiter, bei jedem Pendelschlage also um eine halbe Zahnweite voran. Hat also das Rad 30 Zähne, so wird ein Zeiger, welcher an der Axe desselben befestigt ist, in 60 Sprüngen den ganzen Kreisumfang durchlaufen.

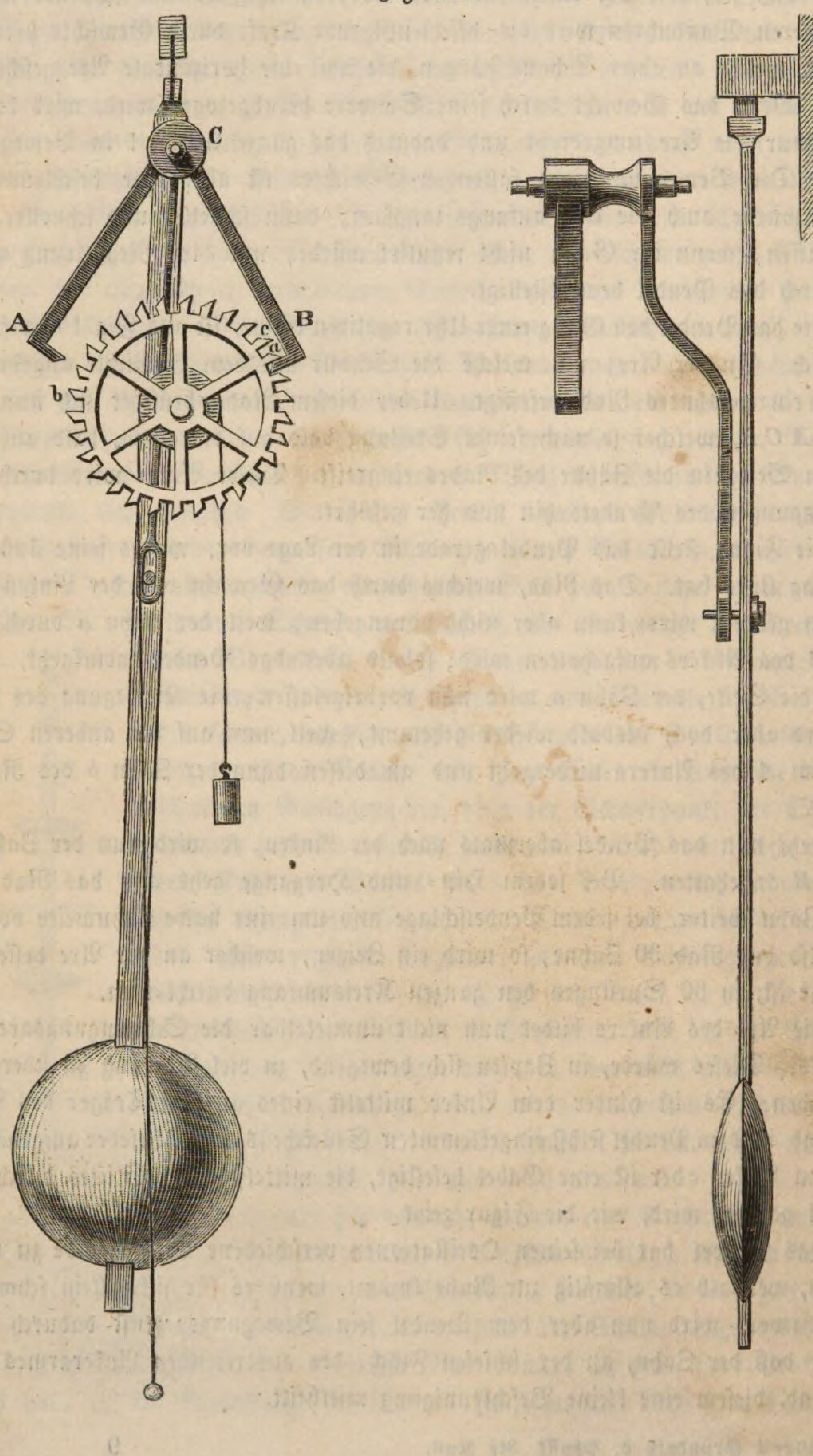
Die Axe des Ankers bildet nun nicht unmittelbar die Schwingungsaxe des Pendels. Dieses würde, in Zapfen sich bewegend, zu viel Reibung zu überwinden haben. Es ist hinter dem Anker mittelst eines an dem Träger des Pendels und in dem Pendel selbst eingeklemmten Stückchens eine Uhrfeder aufgehängt. An dem Anker aber ist eine Gabel befestigt, die mittelst eines Stiftes durch das Pendel geführt wird, wie die Figur zeigt.

Das Pendel hat bei seinen Oscillationen verschiedene Widerstände zu überwinden, weshalb es allmälig zur Ruhe kommt, wenn es für sich allein schwingt. Im Uhrwerk wird nun aber dem Pendel sein Bewegungsverlust dadurch stets ersetzt, daß der Zahn, an der schiefen Fläche des austretenden Ankerarmes hinschleifend, diesem eine kleine Beschleunigung mittheilt.

Eine solche Vorrichtung nennt man eine Hemmung oder ein Echappement.

Bei Taschenuhren ist das Gewicht durch eine gespannte Stahlfeder, das Pendel aber durch die Balance ersetzt, d. h. durch einen Metallring, welcher

Fig. 158.



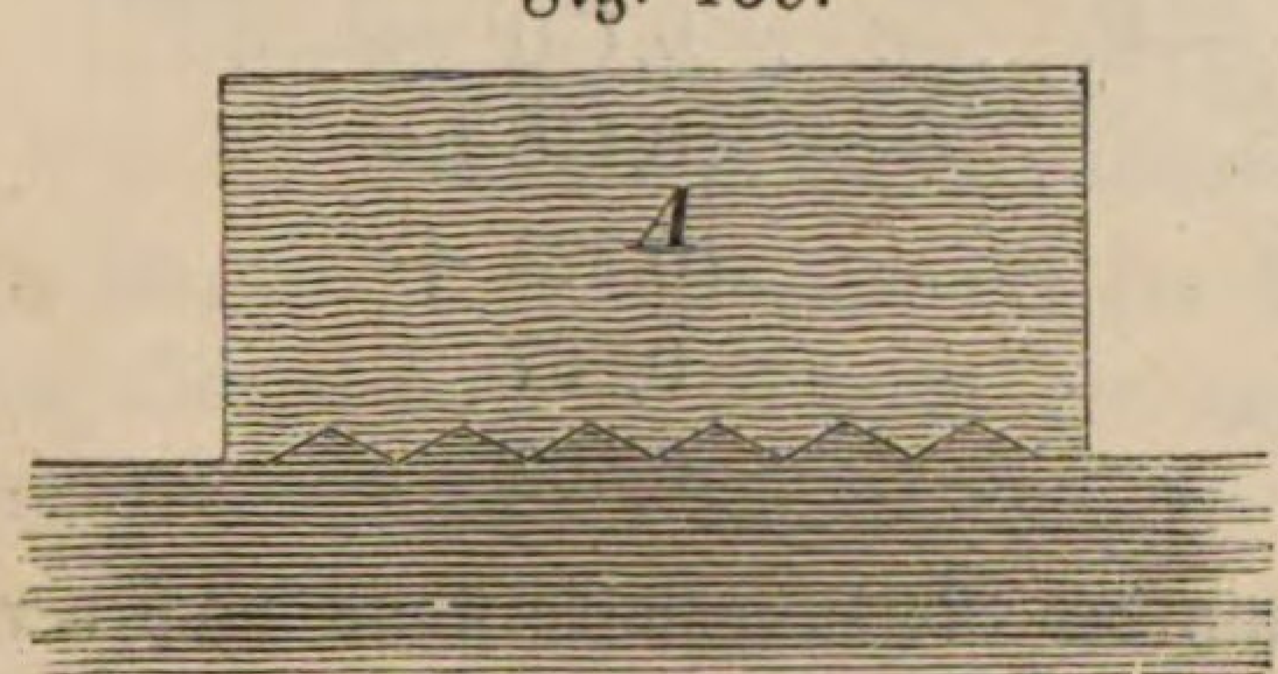
von einer, vermöge ihrer Elasticität um ihre Gleichgewichtslage schwingenden Spiralfeder hin und her bewegt wird.

Hindernisse der Bewegung. Ein schon mehrfach besprochener Widerstand, welcher fast auf alle Bewegungen einen bedeutenden Einfluß ausübt, ist 75
die Reibung. Um eine nur etwas große Last auf einer horizontalen Ebene fortzuschleifen, ist ein bedeutender Kraftaufwand nöthig, welcher lediglich von den Reibungswiderständen herrührt. Wäre die Ebene sowohl, auf welcher die Last fortgeschleift werden soll, als auch die Unterflächen der Last selbst absolut hart und glatt (was in der Natur nie der Fall ist), so könnte die kleinste Kraft die größte Last in Bewegung setzen, und einmal angestoßen, müßte sich die Last mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf der horizontalen Ebene fortbewegen.

Die Reibung rührt unstreitig daher, daß die Erhabenheiten einer jeden der über einander hingleitenden Flächen in die Vertiefungen der anderen eingreifen. Wenn nun Bewegung stattfinden soll, so müssen entweder die hervorragenden Theilchen von der Masse ihres Körpers abgerissen, oder der eine Körper muß fortwährend über die Unebenheiten hinweggehoben werden. Ersteres findet Statt, wenn reibende Flächen sehr rauh sind, oder wenn es auch nur eine derselben ist. Wenn jedoch die reibenden Flächen möglichst geglättet sind, so findet fast ausschließlich die zuletzt erwähnte Wirkungsweise Statt.

Die beistehende Figur 159 soll dazu dienen, die Art und Weise zu versinnlichen, wie ein Widerstand der Bewegung entsteht, wenn ein Körper über kleine Unebenheiten hinweggehoben werden muß.

Fig. 159.



Das Heben des Körpers A geschieht dadurch, daß die tiefsten Punkte der Hervorragungen von A auf den Gipfel der Unebenheiten der Unterlage hinaufgezogen werden müssen, von wo sie alsbald wieder heruntergleiten, worauf dann dieselbe Hebung und Senkung wieder stattfindet. Der Widerstand, welcher sich hier der Bewegung A entgegensetzt, ist also kein anderer als der, welcher überwunden werden müßte, um ihn auf einer absolut glatten, schiefen Ebene hinaufzuziehen.

Wenn diese Ansicht von der Reibung richtig ist, so müssen sich die daraus abgeleiteten Gesetze durch den Versuch bestätigen lassen.

Um die Reibung zu überwinden, muß man, gerade wie wenn man den Körper eine schiefe Ebene hinaufziehen will, eine Kraft anwenden, welche einem aliquoten Theile der Last gleich ist. Die Zahl, welche das Verhältniß dieser Kraft zur Last angiebt, heißt Reibungscoëfficient. Er hängt natürlich

von der Eigenthümlichkeit der reibenden Flächen ab und kann nur durch den Versuch bestimmt werden. Wollte man z. B. auf einer horizontalen Unterlage von Eisen, etwa auf einer Eisenbahn, eine Last von 1 Centner fortschleifen, so würde, wenn die Unterfläche der Schleife ebenfalls aus Eisen besteht, eine Kraft von 27,7 Pfunden nöthig seyn, d. h. derselbe Kraftaufwand, als ob man 27,7 Pfd. vertikal heben wollte. Wenn sich Eisen auf Eisen reibt, so beträgt also der Reibungswiderstand 27,7 Procent, der Reibungscoëfficient ist also für diesen Fall 0,277. Um die Reibungscoëfficienten für verschiedene Körper zu ermitteln, kann man eine Vorrichtung, wie Fig. 9, anwenden. Das Brett *RS* bringt man in die horizontale Lage. Gesetzt dieses Brett sey von Eichenholz; man lege einen 1000 Gramm schweren Klotz von Eichenholz darauf, dessen untere Fläche ebenfalls wohl geglättet seyn muß; an diesem Klotze ist eine Schnur befestigt, welche, wie bei den Versuchen über die schiefe Ebene, um eine Rolle geschlungen ist und eine leichte Schale trägt. Das Gewicht der Schale wird nicht im Stande seyn, Bewegung hervorzubringen; man muß Gewichte auflegen, und erst, wenn das Gewicht der Schale und der Gewichte zusammen 418 Gramm beträgt, wird die Bewegung eben beginnen. Es ergiebt sich aus diesem Versuche der Reibungscoëfficient für Eichen auf Eichen 0,418.

Aendert man die Substanz des in Bewegung zu setzenden Körpers sowohl als die Unterlage, so kann man den Reibungscoëfficienten für verschiedene Körper ausmitteln. Die folgende Tabelle enthält einige der in der Praxis wichtigsten Reibungscoëfficienten.

Eisen auf Eisen	0,277
Eisen auf Messing	0,263
Eisen auf Kupfer	0,170
Eichen auf Eichen	0,418 = 0,273 +
Eichen auf Kiefern	0,667
Kiefern auf Kiefern	0,562.

Durch eine zweckmäßige Schmiere kann der Reibungswiderstand noch verringert werden. Für Metalle ist Oel, für Holz hingegen Talg das beste Schmiermittel.

Bei Hölzern ist es nicht gleichgültig, wie die Fasern laufen; die Reibung ist nämlich bei gekreuzten Fasern (+) viel geringer als bei parallelen (=).

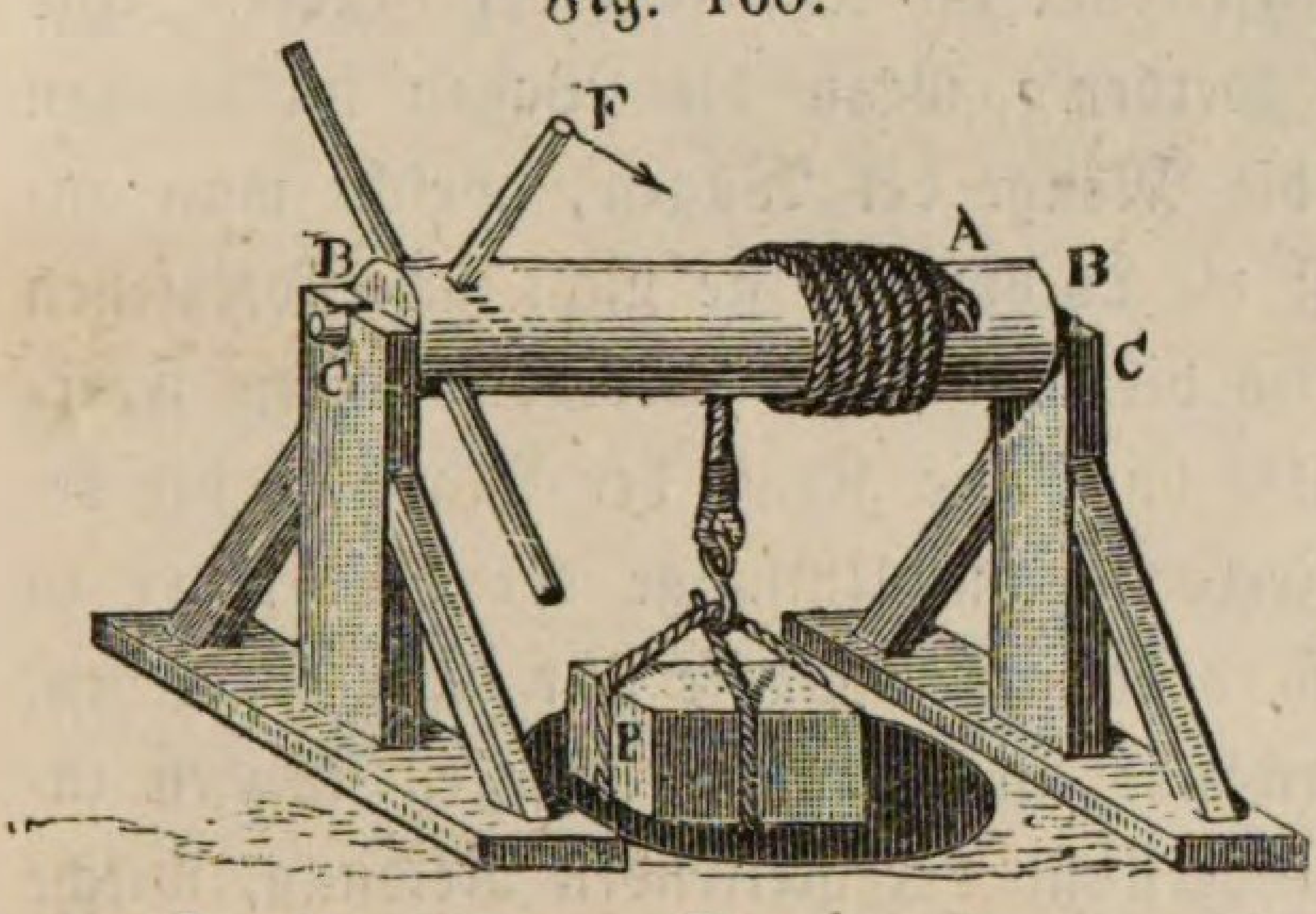
Aus dem bisher Gesagten ergiebt sich unmittelbar, daß die Reibung stets der Last proportional ist. Hätte man bei dem oben beschriebenen Versuche einen Eichenklotz von 2000 Grammen angewendet, so hätte man 836 Gramm an die Schnur hängen müssen, um die Reibung zu überwinden.

Die Größe der reibenden Flächen kann nach den entwickelten Ansichten keinen Einfluß auf die Größe der Reibung haben. Auch dies läßt sich durch den Versuch bestätigen. Gesetzt, der Eichenklotz habe Seitenflächen von ver-

schiedener Größe, so wird man keinen Unterschied im Resultate finden, man mag den Klotz mit der einen oder mit der anderen Fläche auflegen.

Die eben besprochene Art der Reibung wird mit dem Namen der gleitenden Reibung bezeichnet, um sie von der wälzenden Reibung zu unterscheiden, die wir gleich näher betrachten werden. Gleitende Reibung findet unter Anderem auch überall da Statt, wo Zapfen in ihren Pfannen gedreht werden; um in diesem Falle den Effect der Reibung bequemer in Rechnung bringen zu können, braucht man nur zu bedenken, daß sie gerade so wirkt wie ein entsprechendes Gewicht, welches an einer um dieselbe Axe geschlungenen Schnur hängt. Untersuchen wir z. B. den Effect der Reibung an dem schon öfter betrachteten Haspel. Das Gewicht des Wellbaums selbst mit Allem, was daran befestigt ist, betrage 75 Pfd., der zu hebende Stein wiege 100 Pfd., also die am Ende des Hebels wirkende Kraft 25 Pfd., so ist der Gesammtdruck, welchen die Zapfenlager auszuhalten haben, $75 + 100 + 25 = 200$ Pfd. Wenn die Zapfenlager von Messing, die Zapfen aber von Eisen sind, so beträgt der Reibungswiderstand, welcher am Umfange der Zapfen wirkt, 26,3 Procent, der Effect der Reibung ist also derselbe, als ob man statt ihrer um den Zapfen eine Schnur in derselben Richtung geschlungen hätte, wie das Seil, welches die Last trägt, und an dieser Schnur ein Gewicht $200 \times 0{,}263$ oder 52,6 Pfd. angehängt hätte, oder als wenn die am Umfange des Wellbaums wirkende Last um $\frac{52{,}6}{5}$ oder 10,5 Pfd. größer gewesen wäre, vorausgesetzt nämlich, daß der Durchmesser der Zapfen $\frac{1}{5}$ vom Durchmesser des Wellbaums ist. Es werden also bei diesem Haspel circa 10 Procent der angewendeten Kraft für die Ueberwindung der Reibungswiderstände verzehrt.

Fig. 160.



Es bleibt jetzt noch die wälzende Reibung zu betrachten. Wälzende Reibung findet da Statt, wo ein runder Körper, etwa eine Kugel, ein Cylinder, über die Unterlage hinwegrollt. Es kommt dabei die Unterlage stets mit neuen Punkten des rollenden Körpers in Berührung. Der hierbei entstehende Widerstand ist bei weitem geringer als der Widerstand der gleitenden Reibung.

Bei einem Wagenrade findet wälzende Reibung am Umfange des Rades, gleitende Reibung aber an den Axen Statt. Beide Widerstände werden um so geringer, je größer der Durchmesser der Räder ist.

Bei der gleitenden Reibung sowohl als bei der wälzenden ist übrigens auch noch die Adhäsion von bedeutendem Einflusse.

Nutzen und Anwendung der Reibung. Wir haben bisher die Reibung bloß als Bewegungshinderniß betrachtet, welches den Nutzeffect der 76

Maschinen vermindert; die Reibung ist uns aber auch in vielen Fällen von großem Nutzen, und man macht im praktischen Leben vielfach Anwendung von derselben.

Ohne Reibung könnten wir weder gehen noch stehen, wir könnten ohne dieselbe keinen Gegenstand fest in der Hand halten, und ohne Reibung würde kein Nagel, keine Schraube halten.

Daß die Bewegung eines Rades mittelst einer Schnur oder eines Riemens auf ein anderes übertragen werden kann, wie es z. B. bei der Drehbank stattfindet, beruht nur auf der Reibung.

An einer Locomotive werden die mittleren Räder, die sogenannten Triebräder, durch die Kraft der Dampfmaschine umgedreht; der ganze Wagen rollt in Folge dessen fort, denn wenn er stehen bliebe, so könnten sich die Räder nicht umdrehen, ohne daß zwischen den Rädern und den Schienen eine bedeutende gleitende Reibung stattfände, während beim Fortrollen nur die ungleich geringere wälzende Reibung überwunden wird.

Wenn an eine Locomotive eine Reihe von Wagen angehängt wird, so ist bei der Fortbewegung eines jeden ein gewisser Reibungswiderstand zu überwinden, wälzende Reibung am Umfange, gleitende an den Axen der Räder. Alle diese Widerstände müssen überwunden werden, wenn die Wagen fortgezogen werden sollen. Es ist klar, daß man die Menge der Wagen, welche man anhängt, endlich so vermehren könne, daß die Locomotive sie nicht mehr fortziehen kann; in diesem Falle würden sich also die Räder der Locomotive ohne Fortbewegung derselben umdrehen, wobei also durch die Kraft der Maschine der bedeutende Widerstand der gleitenden Reibung am Umfange der Triebräder zu überwinden wäre; der Zug kann also begreiflicher Weise nur dann fortgehen, wenn die Summe aller Reibungswiderstände an allen angehängten Wagen zusammengenommen kleiner ist als der Widerstand der gleitenden Reibung, welche durch Umdrehung der Triebräder der Locomotive an dem Umfange derselben entstehen würde, wenn keine Fortbewegung stattfände.

Aus dieser Betrachtung geht auch hervor, daß die Last, welche eine Locomotive fortzuziehen im Stande ist, nicht allein von der Kraft ihrer Dampfmaschine, sondern auch von ihrem Gewichte abhängt. Nehmen wir an, zwei Locomotiven hätten gleich starke Maschinen, die eine sey aber schwerer als die andere, so wird man mit der schwereren doch eine größere Last fortziehen können.

Zweites Kapitel.

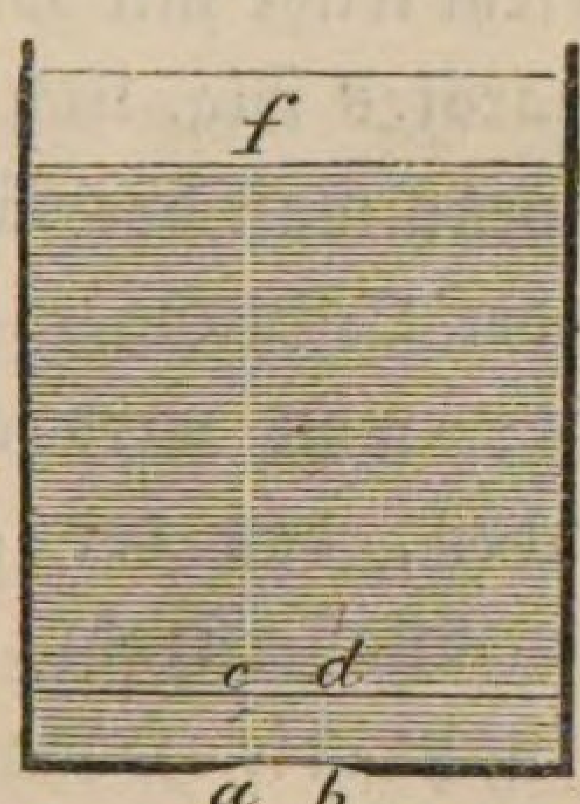
Bewegungsgesetze der Flüssigkeiten.

Wenn man in die Seitenwand oder in den Boden eines mit einer Flüs- 77
sigkeit gefüllten, oben offenen Gefäßes eine Oeffnung macht, welche im Vergleich mit den Dimensionen des Gefäßes klein ist, so strömt die Flüssigkeit mit einer Geschwindigkeit aus, welche um so größer ist, je tiefer sich die Oeffnung unter dem Spiegel der Flüssigkeit befindet. Der Zusammenhang zwischen Ausflußgeschwindigkeit und Druckhöhe läßt sich am einfachsten auf folgende Weise ausdrücken: Die Ausflußgeschwindigkeit ist gerade so groß wie die Geschwindigkeit, welche ein freifallender Körper erlangen würde, wenn er von dem Spiegel der Flüssigkeit bis zur Ausflußöffnung herabfiele.

Dieser Satz ist unter dem Namen des Toricelli'schen Theorems bekannt. Er läßt sich auf folgende Weise ableiten.

Wenn die Flüssigkeitsschicht $abcd$, Fig. 161, welche sich unmittelbar über der Oeffnung ab befindet, frei herabfiele, ohne durch die über ihr lastende Flüssigkeit beschleunigt zu seyn, so würde sie die Oeffnung mit derjenigen Geschwindigkeit verlassen, welche der Höhe ac entspricht, die wir mit h bezeichnen wollen. Diese Geschwindigkeit ist $v = \sqrt{2gh}$ (Seite 111). Nun aber ist die ausströmende Schicht nicht bloß durch ihre eigene Schwere beschleunigt, sondern durch die Schwere der ganzen auf ihr lastenden Flüssigkeit. Die beschleunigende Kraft der Schwere g verhält sich demnach zur beschleunigenden Kraft g', welche die flüssigen Theilchen wirklich austreibt, wie ac zu af oder wie h zu s, wenn die Druckhöhe mit s bezeichnet wird, d. h.

Fig. 161.



$$h : s = g : g',$$

und also ist die auf die ausfließende flüssige Schicht wirkende beschleunigende Kraft $g' = \frac{g}{h} s$. Wenn aber die beschleunigende Kraft, welche auf die ausfließende Schicht wirkt, nicht g, sondern g' ist, so ist auch die Ausflußgeschwindigkeit $c' = \sqrt{2g'h}$; und wenn wir in diesen Werth von c' den abgeleiteten Werth g' setzen, so erhalten wir für die Ausflußgeschwindigkeit den Werth

$$c' = \sqrt{2gs}.$$

Dies ist aber dieselbe Geschwindigkeit, welche ein Körper erlangt, wenn er eine Höhe s frei durchfällt.

Aus diesem Satze folgt unmittelbar:

1) Die Ausflußgeschwindigkeit hängt nur von der Tiefe der Oeffnung unter dem Niveau, aber nicht von der Natur der Flüs-

sigkeit ab. Bei gleichen Druckhöhen muß also Wasser und Quecksilber gleich schnell ausfließen. Jede Quecksilberschicht wird zwar durch einen Druck ausgetrieben, welcher 13,6mal so groß ist als beim Wasser, dagegen ist aber auch die Masse eines Quecksilbertheilchens, welches ausfließt, 13,6mal größer als die eines gleich großen Wassertheilchens.

2) Die Ausflußgeschwindigkeiten verhalten sich wie die Quadratwurzeln der Druckhöhen. Aus einer Oeffnung, welche 100 Centimeter unter dem Wasserspiegel liegt, muß also das Wasser mit 10mal größerer Schnelligkeit ausfließen als aus einer anderen, welche nur 1 Centimeter unter dem Niveau liegt.

78 Um die Ausflußgeschwindigkeit durch den Versuch zu bestimmen, kann man einen vertikal aufsteigenden oder einen in horizontaler Richtung aus dem Gefäße hervorspringenden Strahl beobachten. Wir wollen zuerst den aufwärts steigenden Strahl betrachten.

Wenn das Wasser aus der Oeffnung *o* (Fig. 162) mit derselben Geschwindigkeit hervorspringt, als ob es vom Wasserspiegel im Gefäße bis zur Höhe der Oeffnung *o* herabgefallen wäre, so muß der Wasserstrahl auch wieder bis zur Höhe des Spiegels steigen. Man kann den Versuch sehr leicht mit Hülfe des Apparates Fig. 163 anstellen, wenn man das Wasser aus der Oeffnung *c* fließen läßt; man wird aber dabei finden, daß der aufsteigende Wasserstrahl bei weitem nicht die Höhe erreicht, welche man hätte erwarten sollen.

Fig. 162.

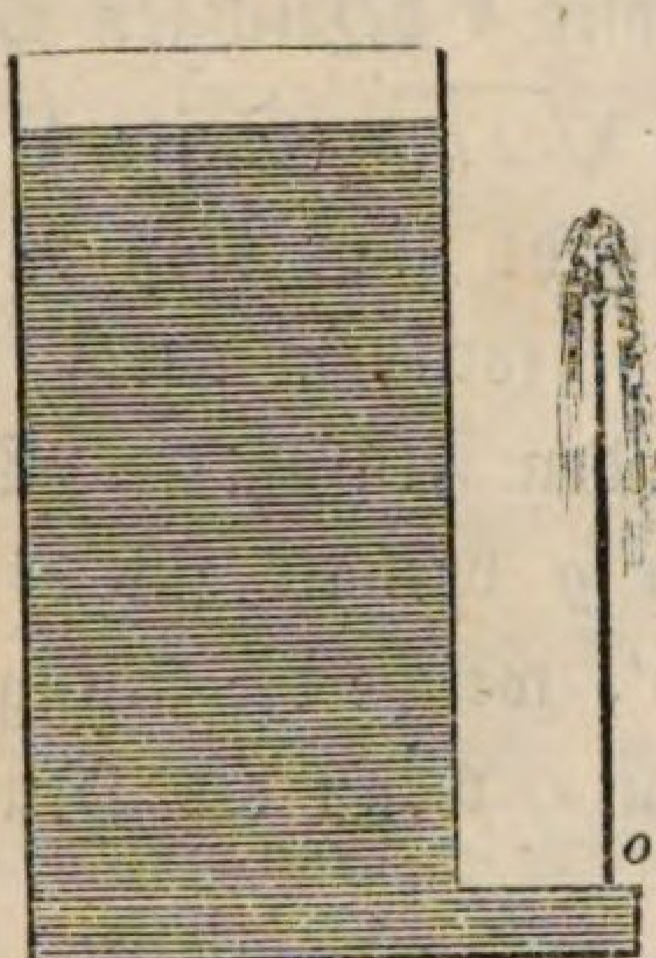
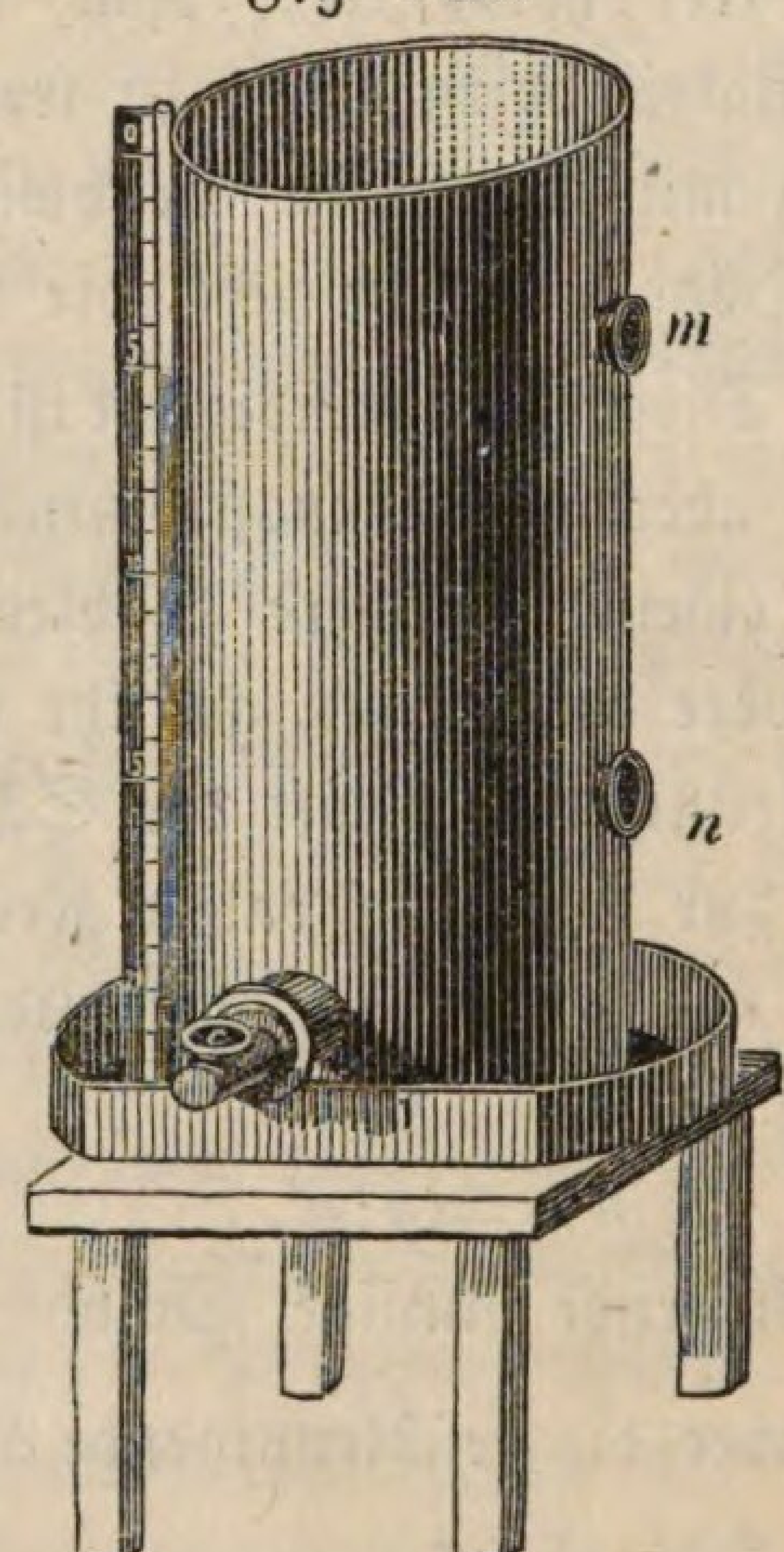


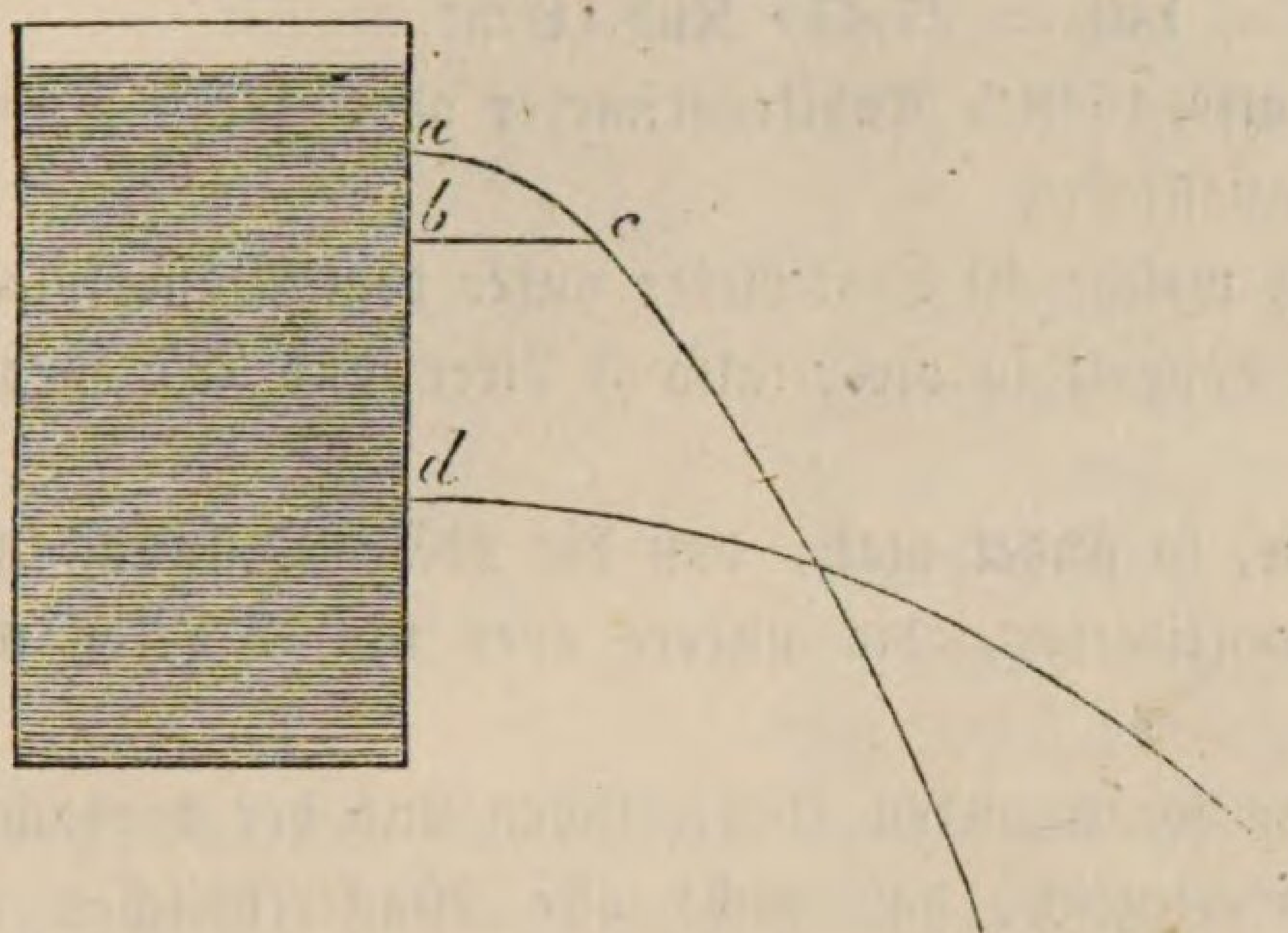
Fig. 163.



Daß der Wasserstrahl die theoretische Höhe nicht erreicht, daran sind jedoch nur die Bewegungshindernisse Schuld; den wesentlichsten Einfluß übt das vom Gipfel wieder herabfallende Wasser aus, indem es das freie Aufsteigen des nachfolgenden Wassers hindert; deshalb steigt auch der Strahl augenblicklich höher, sobald man die Ausflußöffnung so wendet, daß der ausfließende Strahl einen ganz kleinen Winkel mit der Vertikalen macht, daß also das Wasser neben dem aufsteigenden Strahle herabfällt. In diesem Falle kann unter günstigen Umständen, d. h. wenn möglichst wenig Reibung stattfindet, der Strahl eine Höhe erreichen, welche 0,9 der Druckhöhe ist.

Ein in horizontaler Richtung ausfließender Wasserstrahl beschreibt eine Parabel, deren Gestalt von der Ausflußgeschwindigkeit abhängt. Gesetzt, die Oeffnung *a*, Fig. 164, befände sich 0,1 Meter unter dem Wasserspiegel, so ist nach dem Toricelli'schen Gesetze die Ausflußgeschwindigkeit $\sqrt{2.9,8.0,1} = 1,4$ Meter. Wenn also ein Wassertheilchen in irgend einem Momente die Oeffnung verläßt, so wird es nach einer Secunde 1,4 Meter weit von der vertikalen Gefäßwand, in $^2/_{10}$ Secunden also schon 0,28 Meter weit von derselben entfernt seyn.

Fig. 164.



In 0,2 Secunden fällt das Wasser aber 0,196 Meter herab (man findet dies, wenn man für *t* den Werth 0,2 in die Gleichung $s = \frac{g}{2} t^2$ setzt); wenn man demnach von der Oeffnung *a* verkikal herunter die Länge $ab =$ 0,196 Meter abmißt, so muß eine von *b* aus horizontal nach dem Wasserstrahle gezogene Linie *bc* denselben in einer Entfernung von 0,28 Meter treffen.

Aus einer zweiten Oeffnung *d*, welche 0,4 Meter unter dem Wasserspiegel liegt, muß nach der Theorie der Strahl mit einer Geschwindigkeit ausfließen, welche doppelt so groß ist als die Ausflußgeschwindigkeit bei *a*; wenn man also von *d* aus 196 Millimeter herunter mißt und dann eine horizontale Linie nach dem Strahle gezogen denkt, so muß sie denselben in einer Entfernung von 0,56 Meter treffen.

Die Wassermenge, welche aus einer Oeffnung in einer gegebenen Zeit her- 79
vorspringt, hängt offenbar von der Größe der Oeffnung und der Ausflußgeschwindigkeit ab. Wenn alle Wassertheilchen die Oeffnung mit der Geschwindigkeit passirten, welche, nach dem Toricelli'schen Theorem, der Druckhöhe entspricht, so würde die in einer Secunde ausfließende Wassermenge einen Cylinder bilden, dessen Basis gleich der Oeffnung und dessen Höhe gleich dem Wege ist, den ein Wassertheilchen vermöge seiner Geschwindigkeit in einer Secunde zurücklegt. Dieser Weg ist aber die Ausflußgeschwindigkeit selbst, also $\sqrt{2gs}$, und wenn wir also den Flächeninhalt der Oeffnung mit *f* bezeichnen, so ist die Ausflußmenge in einer Secunde

$$m = f.\sqrt{2gs}.$$

Nehmen wir an, die Oeffnungen, welche bei *m* und *n*, Fig. 163, angeschraubt worden sind, seyen kreisförmig; der Durchmesser des Kreises sey

5 Millimeter, so ist der Flächeninhalt der Oeffnung $f = 19{,}625$ Quadratmillimeter oder 0,19625 Quadratcentimeter; wenn die Druckhöhe 10 Centimeter ist, so ist, wie wir schon berechnet haben, die Ausflußgeschwindigkeit 1,4 Meter = 140 Centimeter, also

$$m = 0{,}19625 \times 140 = 27{,}475 \text{ Kub.-Cent.}$$

In einer Minute müßten also 1648,5 Kubikcentimeter oder 148,5 Kubikcentimeter mehr als 1½ Liter ausfließen.

Eine gleich große Oeffnung, welche 40 Centimeter unter dem Wasserspiegel liegt, müßte in einer Minute doppelt so viel, also 3 Liter und 297 Kubikcentimeter Wasser geben.

Stellt man den Versuch an, so findet man, daß die obere Oeffnung nur ungefähr 1 Liter und 55 Kubikcentimeter, die untere aber nur 2 Liter und 110 Kubikcentimeter giebt.

Diese Differenz zwischen der sogenannten theoretischen und der beobachteten Ausflußmenge beweist unwiderleglich, daß nicht alle Wassertheilchen die Oeffnung mit der Geschwindigkeit passiren, welche der Druckhöhe entspricht. In der That haben im Querschnitte der Oeffnung nur die in der Mitte sich befindenden Wasserfäden diese Geschwindigkeit, während sie für die mehr nach dem Rande der Oeffnung hin ausfließenden geringer ist, wie dies auch nothwendig nach der folgenden Betrachtung seyn muß.

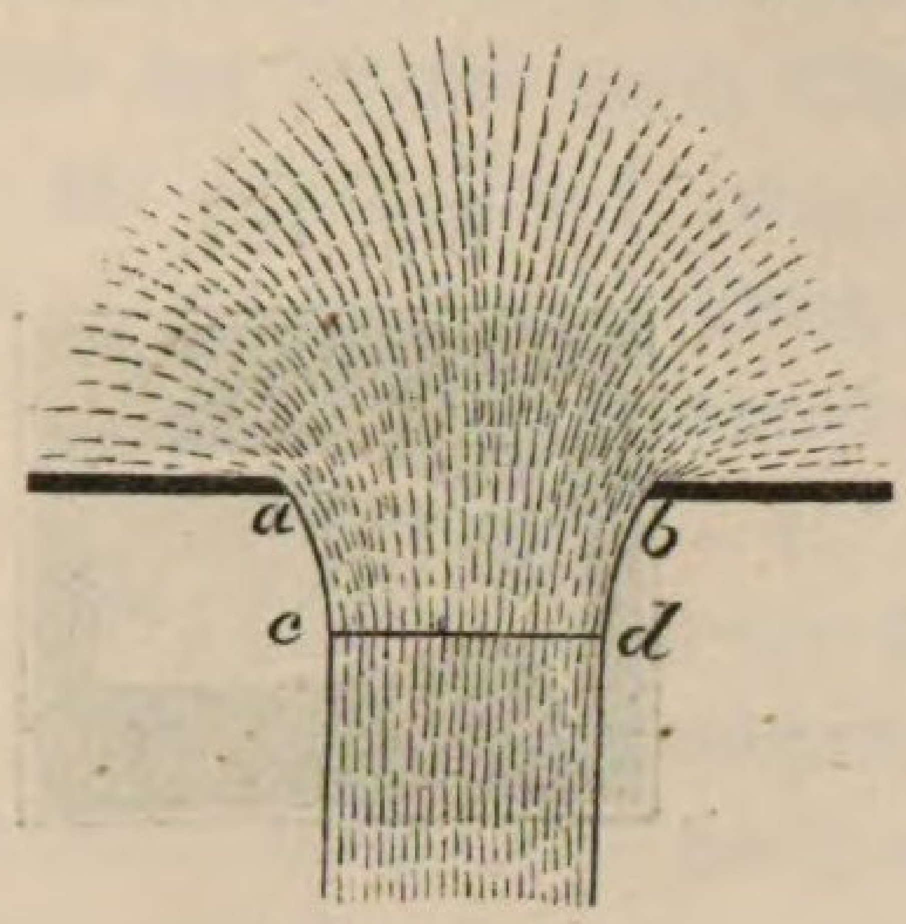
In einem weiten Gefäße mit enger Oeffnung kann die ganze flüssige Masse, mit Ausnahme der in der Nähe der Oeffnung befindlichen Theile, als ruhend betrachtet werden. Die nach einander ausströmenden Schichten beginnen also ihre Bewegung nicht zu gleicher Zeit, die vordersten haben bereits das Maximum der Geschwindigkeit erreicht, während die hintersten erst ihre Bewegung beginnen. Es würde dies ein Zerreißen der auf einander folgenden Schichten zur Folge haben, wenn sich leere Räume bilden könnten. Weil dies aber nicht möglich ist, so ziehen sich die einzelnen Schichten mehr in die Länge, während ihr Durchmesser abnimmt; in dem Maße aber als der Querschnitt dieser Schichten sich vermindert, müssen andere Wassertheilchen von den Seiten zufließen; da diese aber ihre Bewegung erst später beginnen, so ist klar, daß sie mit einer geringeren Geschwindigkeit in der Oeffnung selbst ankommen, als die centralen Wasserfäden.

Während also der Kern des ausfließenden Strahls in dem Momente, in welchem er die Oeffnung verläßt, die der Druckhöhe entsprechende Geschwindigkeit hat, ist er von Wasserfäden umgeben, deren Geschwindigkeit um so geringer ist, je näher sie dem Rande der Oeffnung sind: und daraus folgt denn, daß die Ausflußmenge geringer sein muß, als wenn alle Theilchen die Oeffnung mit der Geschwindigkeit des Kernstrahls verließen.

Eine Folge davon, daß die centralen Wasserfäden beim Durchgange durch die Oeffnung eine größere Geschwindigkeit haben als die Randfäden, und daß letztere zugleich noch mit einer nach der Mitte des Wasserstrahls gerichteten Geschwindigkeit behaftet sind, ist auch, daß der ausfließende Wasserstrahl nicht

vollkommen cylindrisch ist, sondern daß er sich vor der Oeffnung zusammenzieht, wie dies Fig. 165 dargestellt ist. Bei *cd* beträgt der Querschnitt des Wasserstrahls ungefähr noch ⅔ vom Flächeninhalte der Oeffnung. Ebenso beträgt die wirkliche Ausflußmenge ungefähr ⅔ der theoretischen.

Fig. 165.



Einfluß der Ansatzröhren auf die Ausflußmenge. 80
Wenn der Ausfluß nicht durch Oeffnungen geschieht, welche in eine dünne Wand gemacht sind, sondern durch kurze Röhren, so finden merkwürdige Modificationen Statt, die wir jetzt näher betrachten wollen.

Wenn eine Ansatzröhre genau die Gestalt des freien Strahles von der Oeffnung bis zu der Stelle hat, von welcher an die Contraction nicht mehr merklich zunimmt, so übt sie gar keinen Einfluß auf die Ausflußmenge aus.

Durch cylindrische Ansatzröhren fließt der Strahl entweder frei durch, wie durch eine Oeffnung von gleichem Durchmesser, und in diesem Falle übt die Röhre keinen Einfluß aus, oder das Wasser hängt sich an die Wände der Röhre, so daß die Flüssigkeit die ganze Röhre ausfüllt und ein Strahl vom Durchmesser der Röhre ausfließt; in diesem Falle veranlaßt die Ansatzröhre eine Vermehrung der Ausflußmenge. Während eine Oeffnung in dünner Wand 0,64 der theoretischen Ausflußmenge giebt, erhält man durch eine solche cylindrische Ansatzröhre von gleichem Durchmesser 84 Procent, vorausgesetzt, daß die Länge der Röhre ihrem vierfachen Durchmesser gleich ist. Bei geringer Druckhöhe ist der Strahl stets anhängend, bei großer Druckhöhe hingegen ist er frei. Bei mittlerem Drucke kann man ihn nach Belieben bald frei, bald anhängend machen; ein geringes Hinderniß stellt das Anhängen her, und oft reicht ein ganz schwacher Stoß hin, um den Strahl wieder frei zu machen.

Ein conisches Ansatzrohr wirkt, im Falle es voll ausfließt, wie ein cylindrisches, nur bewirkt es eine noch größere Vermehrung der Ausflußmenge.

Die Ausflußgeschwindigkeit wird durch cylindrische oder conische Ansatzröhren in demselben Verhältnisse vermindert, in welchem die Ausflußmenge vermehrt wird.

Es ist jetzt noch zu untersuchen, wie es kommt, daß Ansatzröhren die Ausflußmenge auf die erwähnte Weise vermehren und die Ausflußgeschwindigkeit dagegen vermindern.

Indem das Wasser in das Ansatzrohr einströmt, erleidet es eine Contraction, wie wenn es aus einer Oeffnung in dünner Wand ausflösse; weiterhin aber, sobald einmal die Röhrenwände benetzt sind, bewirkt die Adhäsion an die Röhrenwände, daß sich die Ansatzröhre vollständig ausfüllt, und somit ist der Querschnitt des Strahles durch das Ansatzrohr vergrößert, er ist beim Austritte

aus dem Rohre größer als an der Stelle der Contraction, wie man dies in Fig. 166 sieht. Daß eine solche Contraction in der Röhre wirklich stattfinden

Fig. 166.

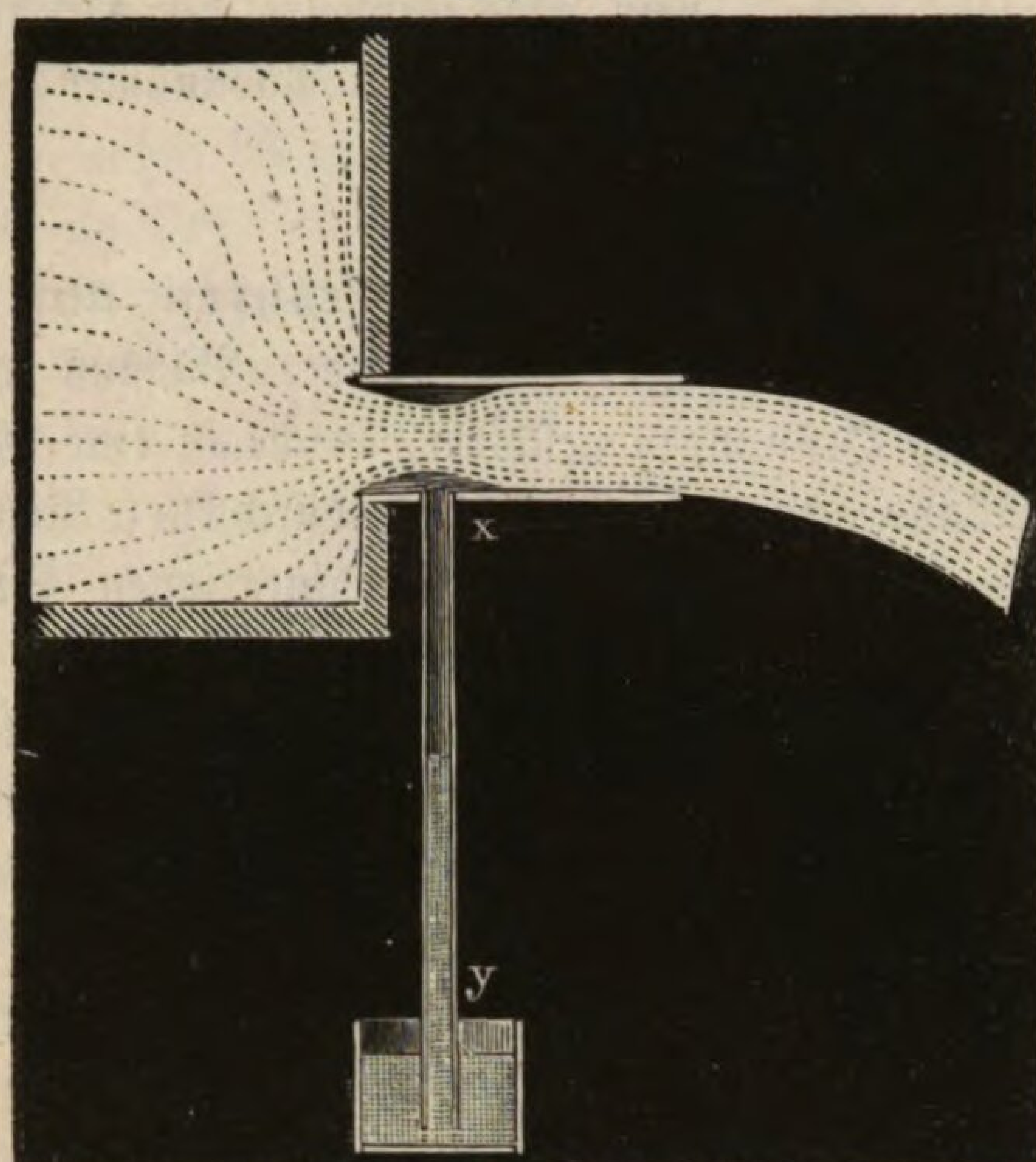
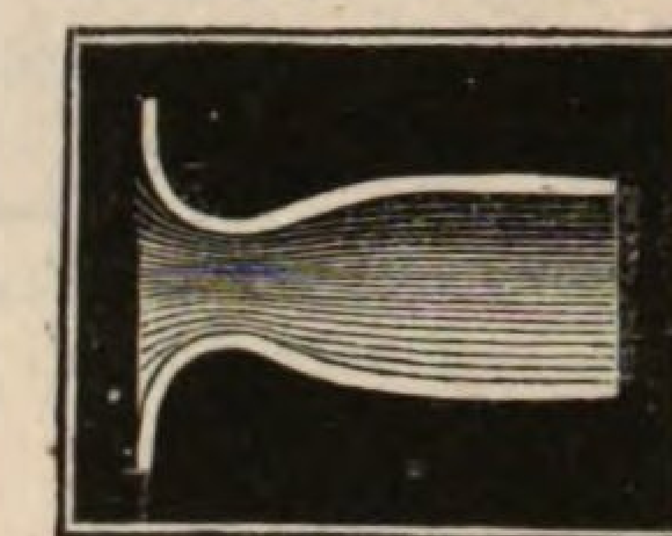


Fig. 167.



muß, geht daraus hervor, daß, wenn man dem Ansatzrohre die Gestalt des contrahirten Strahles giebt, wie in Fig. 167, der Ausfluß vollkommen so stattfindet, als ob das Ansatzrohr ganz cylindrisch wäre.

Wenn nun die Wassertheilchen, den ganzen Querschnitt der Röhre ausfüllend, dieselbe mit der Geschwindigkeit verließen, mit welcher sie die Stelle der größten Contraction passiren, so müßte nothwendig ein Zerreißen der auf einander folgenden Wasserschichten eintreten. Die Trennung der Wassertheilchen, also die Bildung von leeren Räumen, wird aber durch den Druck der Luft verhindert, welche den Einfluß der Wassertheilchen in das Rohr beschleunigt, dagegen aber auch den Ausfluß aus demselben verzögert. Durch den Druck der Luft werden die ausfließenden Wassertheilchen so viel zurückgehalten, daß dadurch ein voller Ausfluß möglich wird.

Daß der Luftdruck hier wirklich diese Rolle spielt, geht ganz vorzüglich daraus hervor, daß, wenn das Wasser in einen luftleeren Raum ausfließt, die Ausflußmenge durch Ansatzröhren nicht vermehrt wird.

Macht man in die Seitenwand der Ansatzröhre ein Loch, so wird durch diese Oeffnung Luft eingesaugt, und der Strahl hört auf, continuirlich zu seyn.

Wenn in diese Seitenöffnung eine Röhre xy, Fig. 166, eingesetzt wird, deren unteres Ende in ein Gefäß mit Wasser mündet, so wird durch das Bestreben des Wassers, in der Ansatzröhre einen luftleeren Raum zu bilden, das Wasser in der Röhre xy in die Höhe gesaugt. Dieses Phänomen des Saugens beweist ebenfalls den Einfluß des Luftdrucks auf die soeben betrachteten Erscheinungen. Da eine conische Ansatzröhre eine noch größere Ausflußmenge giebt als eine cylindrische, so muß sie auch ein stärkeres Saugen erzeugen, d. h. es wird in der Röhre xy unter übrigens gleichen Umständen durch

ein conisches Ansatzrohr die aufgesaugte Wassersäule zu einer größeren Höhe gehoben als durch ein cylindrisches.

Seitendruck bewegter Flüssigkeiten. Wenn aus irgend einem Re- 81
servoir das Wasser durch Röhren abfließt, würden die Seitenwände der Röhren gar keinen Druck auszuhalten haben, wenn keine Reibungswiderstände zu überwinden wären, die unter Umständen sehr bedeutend wirken können, so daß der größte Theil des hydrostatischen Druckes zur Ueberwindung dieser Widerstände verloren geht und der Bewegung nicht zu Gute kommt.

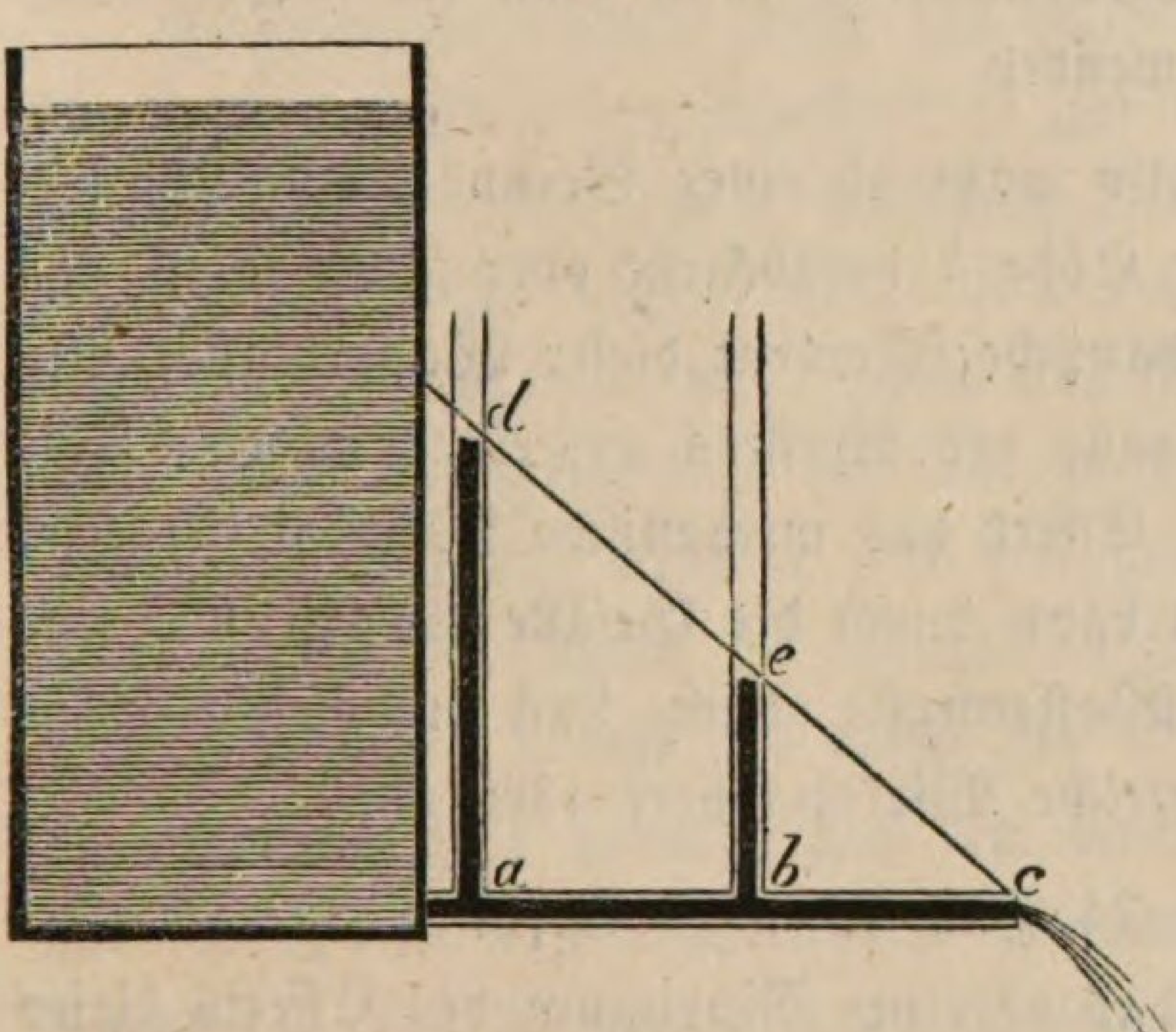
Man schraube statt der Platte mit der Oeffnung *n*, Fig. 163, einen Kork an den Apparat, in welchem eine etwa drei Fuß lange Glasröhre steckt, und gebe dieser Röhre eine horizontale Stellung, so wird das Wasser am Ende der Röhre weit langsamer ausfließen, als wenn der Ausfluß durch die Oeffnung *n* stattgefunden hätte.

Wendet man mehrere gleich lange Röhren von verschiedenem Durchmesser zu diesem Versuche an, so sieht man, wie die Ausflußgeschwindigkeit abnimmt, wenn die Röhren enger werden.

Gesetzt, man habe gefunden, daß die Ausflußgeschwindigkeit für eine dieser Röhren nur halb so groß sey, als man nach der Größe der Druckhöhe hätte erwarten sollen, so ist die Hälfte des ganzen Druckes zur Ueberwindung der Reibung nöthig, und nur die andere Hälfte kommt der Bewegung zu gut.

Wenn in der Röhre *a c*, Fig. 168, das Wasser sich mit der Geschwindigkeit bewegte, welche der Druckhöhe im Reservoir entspricht, so hätten die Röhrenwände, wie schon bemerkt, gar keinen Druck auszuhalten; wenn aber das Wasser im Behälter in der Röhre eine Bewegung hervorbringt, welche nur einem Theile der Druckhöhe entspricht, so muß der Rest als hydrostatischer Druck auf die Röhrenwände wirken. Der Druck, den die Wände auszuhalten haben, ist jedoch nicht an allen Stellen der Röhre gleich, er ist um so geringer, je mehr man sich der Ausflußöffnung *c* nähert.

Fig. 168.

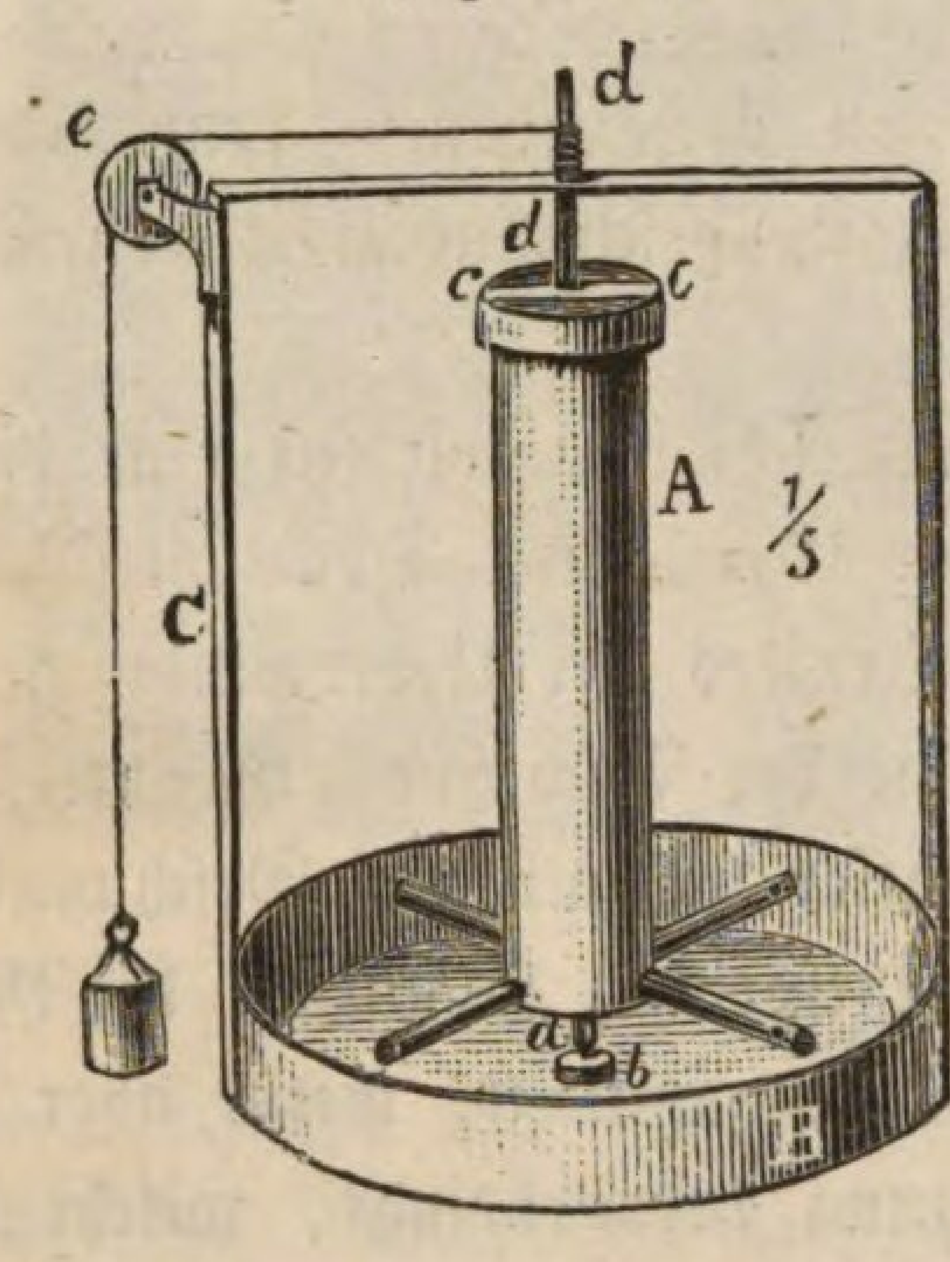


In manchen Fällen kann der Druck, den die Röhrenwände von innen auszuhalten haben, kleiner seyn als der von außen auf sie wirkende Luftdruck; es ist dies überall da der Fall, wo die Bedingungen erfüllt sind, unter welchen das Phänomen des Saugens stattfinden kann.

**Reaction, welche durch das Ausströmen der Flüssigkeiten er- 82
zeugt wird.** Denken wir uns ein Gefäß, welches mit Wasser gefüllt ist, so bleibt Alles in Ruhe, weil jeder Seitendruck durch einen vollkommen gleichen,

aber entgegengesetzten aufgehoben wird. Wenn man aber die Wand an irgend einer Stelle durchbohrt, so daß das Wasser hervorspringt, so ist der Druck an dieser Stelle offenbar weggenommen, während das der Oeffnung diamentral gegenüberliegende Wandstück noch gerade so stark gedrückt wird als vorher. Der Druck auf diejenige Gefäßwand, in welcher sich die Oeffnung befindet, ist also geringer als der Druck, welchen die gegenüberstehende Wand aushält, mithin wird das ganze Gefäß sich in einer Richtung bewegen müssen, welche der Richtung des ausfließenden Wasserstrahls entgegengesetzt ist, vorausgesetzt daß diese Bewegung nicht durch Reibung oder auf irgend eine andere Weise verhindert wird. Es ist dies dem Rückstoße der Geschütze zu vergleichen. Man kann die beim Ausfließen des Wassers wirkende Reaction durch einen Apparat anschaulich machen, welcher unter dem Namen des Segnerschen Wasserrades bekannt ist. Es besteht aus einem um eine vertikale Axe leicht drehbaren Gefäße *A*, an dessen unterem Ende sich vier horizontale Röhren befinden, die alle auf derselben Seite eine kleine Oeffnung haben. Das Gefäß dreht sich nach derjenigen Richtung um, welche der Richtung der ausströmenden Wasserstrahlen entgegengesetzt ist.

Fig. 169.



83 **Vertikale Wasserräder.** Wenn Wasser fortwährend von einem höher gelegenen zu einem tiefer gelegenen Orte herabfließt, so kann man ein solches Wassergefälle als eine bewegende Kraft anwenden.

Wenn während der Zeiteinheit, also während einer Secunde, eine Wassermasse, deren Gewicht *M* ist, von einer Höhe *h* herabfließt oder fällt, so ist *Mh* die Bewegungsquantität oder das mechanische Moment dieser Wassermasse. Auf welche Weise man nun auch die Bewegung des Wassers auf einen anderen Körper übertragen mag, so kann doch der Effect das mechanische Moment des Gefälles niemals übertreffen, d. h. man kann durch die Gefälle höchstens eine der in der Zeiteinheit herabfließenden Wassermasse gleiche Last auf gleiche Höhe heben, oder irgend eine andere dieser gleiche Wirkung hervorbringen.

Wenn z. B. von einer Höhe von 24 Fuß in jeder Secunde eine Wassermasse von 800 Pfd. herabfällt, so ist das absolute Maximum des Effects dieses Gefälles 19200 Fußpfund, d. h. es könnte durch dieses Gefälle, wenn alle Kraft vollständig zur Wirkung käme, wenn nichts durch Reibung und andere Widerstände verloren ginge, eine Wirkung hervorgebracht werden, welche der Hebung einer Last von 19200 Pfd. in einer Secunde 1 Fuß hoch gleichzusetzen ist.

Nimmt man nun an, daß ein Pferd, mit mittlerer Kraft und Geschwindigkeit arbeitend, in einer Secunde eine Last von 100 Pfund 4 Fuß hoch he-

ben kann, so wäre das absolute Maximum des Effects jenes Gefälles 48 Pferdekräften gleichzusetzen.

Wir wollen im Folgenden das absolute Maximum des Effects eines Gefälles mit E bezeichnen.

Um das mechanische Moment eines Wassergefälles zu benutzen, wendet man meistens Wasserräder, d. h. Räder an, an deren Umfange das Wasser durch Druck oder Stoß wirkt.

Die gewöhnlichen Wasserräder drehen sich in vertikaler Ebene um eine horizontale Axe. Man unterscheidet drei Hauptarten der vertikalen Wasserräder, unterschlächtige, oberschlächtige und mittelschlächtige.

Bei den unterschlächtigen Rädern stehen die Schaufeln rechtwinklig auf dem Umfange des Rades. Die untersten Schaufeln sind in das Wasser eingetaucht, welches mit einer Geschwindigkeit fortfließt, welche von der Höhe des Gefälles abhängt.

Das fließende Wasser setzt nun auch das Rad in Bewegung und theilt ihm eine Geschwindigkeit mit, welche nach Umständen bald größer, bald kleiner seyn wird.

Wenn der Stoß des Wassers dem Rade eine Geschwindigkeit mittheilen soll, welche derjenigen gleich ist, mit welcher das Wasser fließen würde, wenn das Rad gar nicht da wäre, so darf das Rad dieser Bewegung gar keinen Widerstand entgegensetzen, es darf also gar nicht belastet seyn, mithin kann es in diesem Falle gar keine mechanische Wirkung hervorbringen, der Effect ist gleich Null.

Andererseits könnte man das Rad so stark durch ein Gegengewicht belasten, daß der Stoß des Wassers es gar nicht in Bewegung setzt, daß das Wasser des Gefälles nur einen statischen Druck ausübt, welcher jenem das Gleichgewicht hält. In diesem Falle ist der Effect abermals Null. Aus dieser Betrachtung geht hervor, daß, wenn das Rad eine Arbeit vollbringen soll, es mit einer Geschwindigkeit sich bewegen muß, welche geringer ist als die des frei fließenden Wassers; Theorie und Erfahrung zeigen, daß man die vortheilhafteste Wirkung erhält, wenn die Geschwindigkeit des Rades halb so groß ist als die Geschwindigkeit, welche der Höhe des Gefälles entspricht.

Daraus geht hervor, daß bei einem gewöhnlichen unterschlächtigen Rade nur die Hälfte des mechanischen Momentes des Gefälles zur Wirkung kommt, indem das Wasser noch mit der Hälfte der Geschwindigkeit abfließt, mit welcher es vor dem Rade ankam; der Effect eines solchen Rades kann also den Werth $\frac{1}{2}E$ nie übersteigen.

Allein selbst diese Wirkung kann in der Praxis nicht erreicht werden, weil immer ein Theil der Kraft durch Adhäsion des Wassers an den Wänden des Gerinnes, durch Reibungswiderstände u. s. w. verloren geht. Sorgfältig angestellte Versuche ergaben für unterschlächtige Räder, welche sich in einem Ge-

rinne bewegen, so daß kein seitliches Abfließen des Wassers stattfinden kann, den Werth

$$e = 0{,}3\ E.$$

Bei freihängenden Rädern aber, wie man sie an Schiffsmühlen anbringt, wo das Wasser seitlich abfließen kann, ist der Effect noch weit mehr vom absoluten Maximum entfernt.

Die unterschlächtigen Räder werden da angewendet, wo man über ein Gefälle von ziemlich bedeutender Wassermenge, aber geringer Fallhöhe zu disponiren hat.

Weil durch die eben betrachteten unterschlächtigen Räder bei dem rechtwinkligen Stoße des Wassers gegen die Schaufeln das mechanische Moment des Gefälles so sehr schlecht benutzt wird, hat Poncelet ein unterschlächtiges Rad mit krummen Schaufeln construirt, dessen Effect dem absoluten Maximum weit näher kommt.

Wenn das Wasser ganz ohne Stoß auf das Rad kommen soll, so müßten die Schaufeln am Radumfange mit der Richtung der Tangente zusammenfallen; wollte man aber die Schaufeln wirklich so construiren, daß dieser Bedingung Genüge geleistet wird, so wäre der Austritt des Wassers aus dem Rade gehemmt; auch darf das Wasser seine Geschwindigkeit doch nicht vollständig an das Rad abtreten, weil ihm sonst keine Geschwindigkeit zum Abflusse mehr bliebe. Somit ist auch bei dem Poncelet'schen Rade ein gewisser Verlust, die Widerstände ungerechnet, unvermeidlich.

Solche Räder mit krummen Schaufeln sollen einen Effect geben, welcher $^2/_3$ bis $^3/_4$ des absoluten Maximums ist. Der größere Effect der Poncelet'schen Räder erklärt sich dadurch, daß das Wasser, indem es auf der krummen Schaufel hinaufsteigt, seine Geschwindigkeit verliert und größtentheils an das Rad abgiebt.

Die oberschlächtigen Räder werden bei höheren Gefällen von geringerer Wassermasse, bei kleineren Gebirgsbächen angewendet. Das Wasser füllt, von oben auf das Rad laufend, die Zellen auf der einen Seite des Rades, welches eben durch dieses Uebergewicht umgedreht wird. Nahe am unteren Ende des Rades läuft das Wasser aus den Zellen wieder aus. Bei oberschlächtigen Rädern geht ebenfalls ein Theil des mechanischen Momentes des Gefälles verloren, weil die Zellen das Wasser nicht bis zum tiefsten Punkte des Rades behalten können, sondern schon früher auszugießen beginnen. Ein gut gebautes oberschlächtiges Rad soll einen Effect hervorbringen, welcher 75 Procent des absoluten Maximums beträgt, vorausgesetzt, daß es sich langsam umdreht, denn bei rascher Umdrehung bleibt das Wasser in den Zellen in Folge der Centrifugalkraft nicht horizontal, sondern es steigt nach außen, so daß es noch früher aus den Zellen herausfällt.

Das mittelschlächtige Rad bildet eine Art Mittelgattung zwischen dem unterschlächtigen und oberschlächtigen.

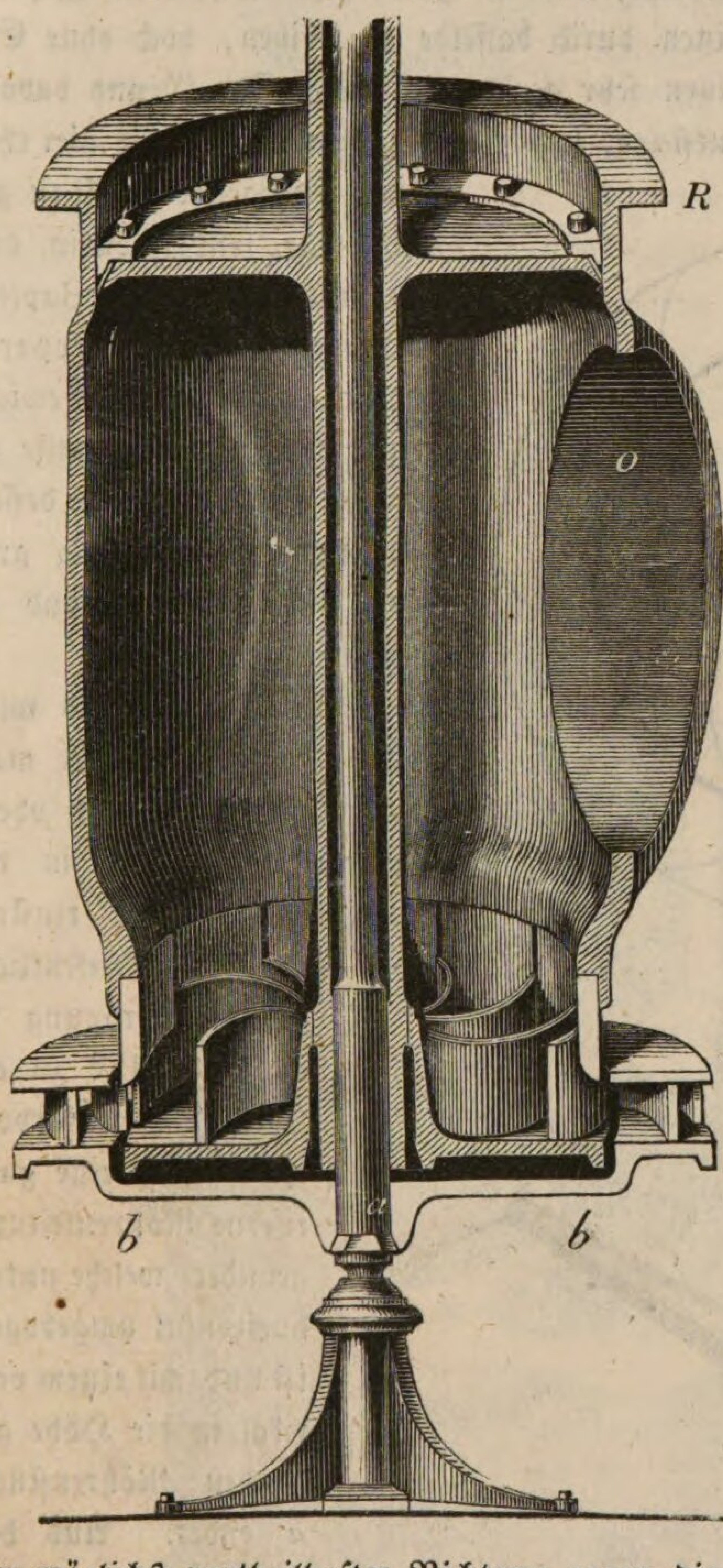
84 **Horizontale Wasserräder.** Schon früher hatte man versucht, hori-

zontale Wasserräder zu construiren, allein erst in neuerer Zeit sind sie durch Fourneyron in die Praxis eingeführt worden. Die horizontalen Wasserräder sind unter dem Namen der Turbinen bekannt.

Fig. 170 stellt eine für ein hohes Gefälle construirte Turbine dar.

Die ganze Wassermasse des Gefälles ist in einem weiten gußeisernen Rohre angesammelt, aus welchem sie in ein gußeisernes Behälter durch die Oeffnung *o* eintritt. Durch die Mitte dieses Reservoirs geht eine hohle Röhre, welche den oberen Deckel mit dem Boden verbindet; der obere Rand des Reservoirs liegt auf Mauerwerk oder auf Balken fest auf. Der horizontale Boden stößt nicht an die vertikalen Wände des Gefäßes an sondern es befindet sich zwischen ihm und den Seitenwänden ein ringförmiger Zwischenraum, aus welchem das Wasser in horizontaler Richtung herausströmt.

Fig. 170.



Dieses hier ausströmende Wasser setzt nun das horizontale Rad, dessen Schaufeln vertikal stehen, in Bewegung; *a a* ist die vertikale Axe, um welche sich das Rad dreht; sie geht durch die Hülse hindurch, welche Boden und Deckel des Reservoirs verbindet. An dieser Axe ist der Teller *b b* befestigt, welcher, der Oeffnung des Reservoirs gegenüber, den Radkranz mit den Schaufeln trägt.

Die Schaufeln sind gekrümmt, wie man im Grundrisse, Fig. 171 a. f. S., sieht; um aber zu bewirken, daß das Wasser in möglichst vortheilhafter Richtung gegen die Schaufeln des Rades stößt, sind auf dem Boden des Reservoirs Leitkurven von Blech aufgesetzt, welche dem ausströmenden Wasser eine bestimmte Richtung geben.

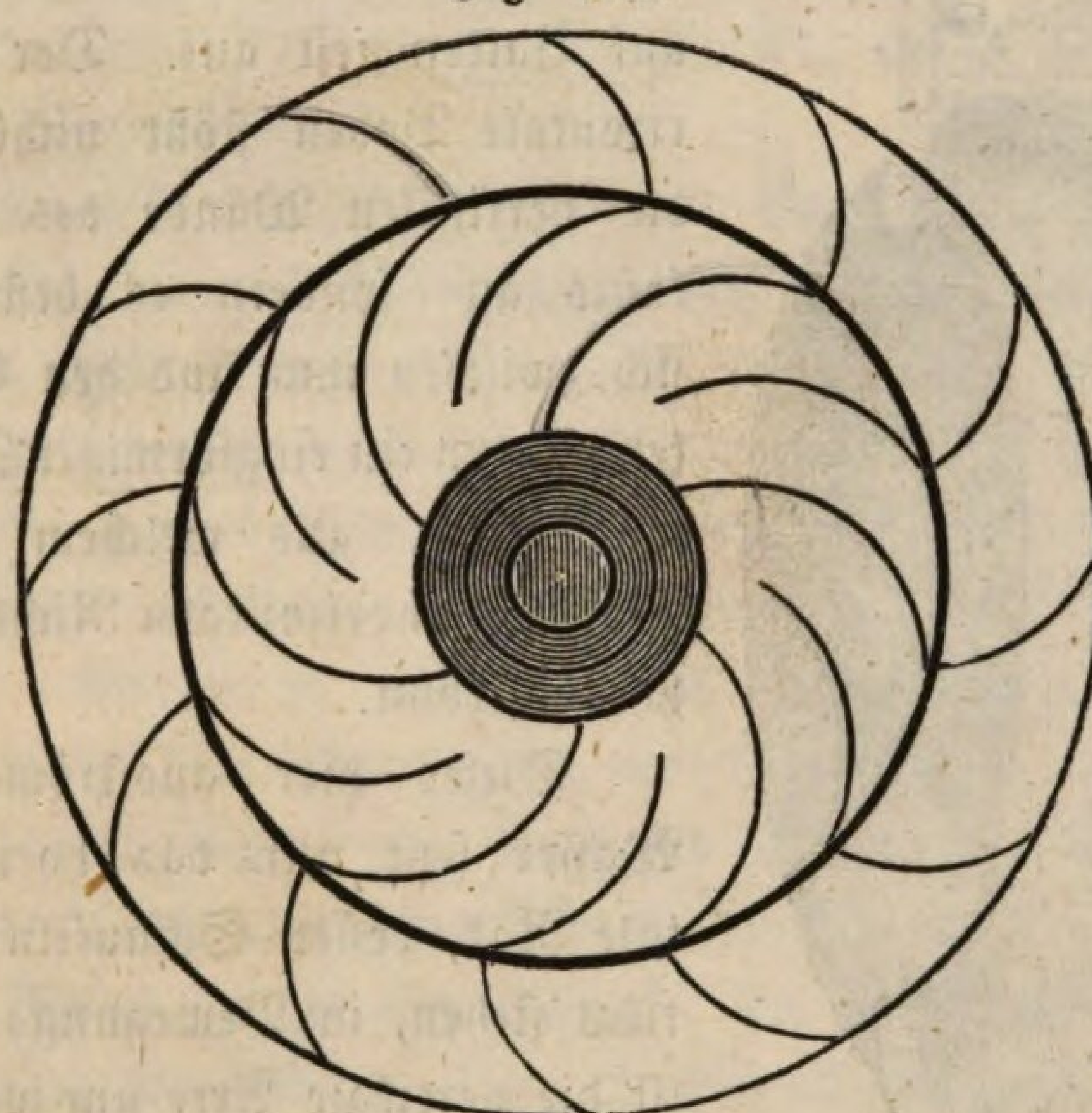
Die vortheilhafteste Krümmung der Schaufeln und Leitkurven näher zu betrachten, würde uns zu weit führen.

Gut construirte Fourneyron'sche Turbinen sollen einen Effect geben, welcher 75 Procent des absoluten Maximums beträgt. Gadiat hat die Turbinen durch Weglassung der Leitkurven vereinfacht und dadurch nur noch 5 Procent des absoluten Maximums verloren, so daß seine Turbinen noch 70 Procent Effect geben sollen.

Die Turbinen erweisen sich bei sehr hohen Gefällen, welche keine vertikalen Räder mehr zulassen, besonders zweckmäßig.

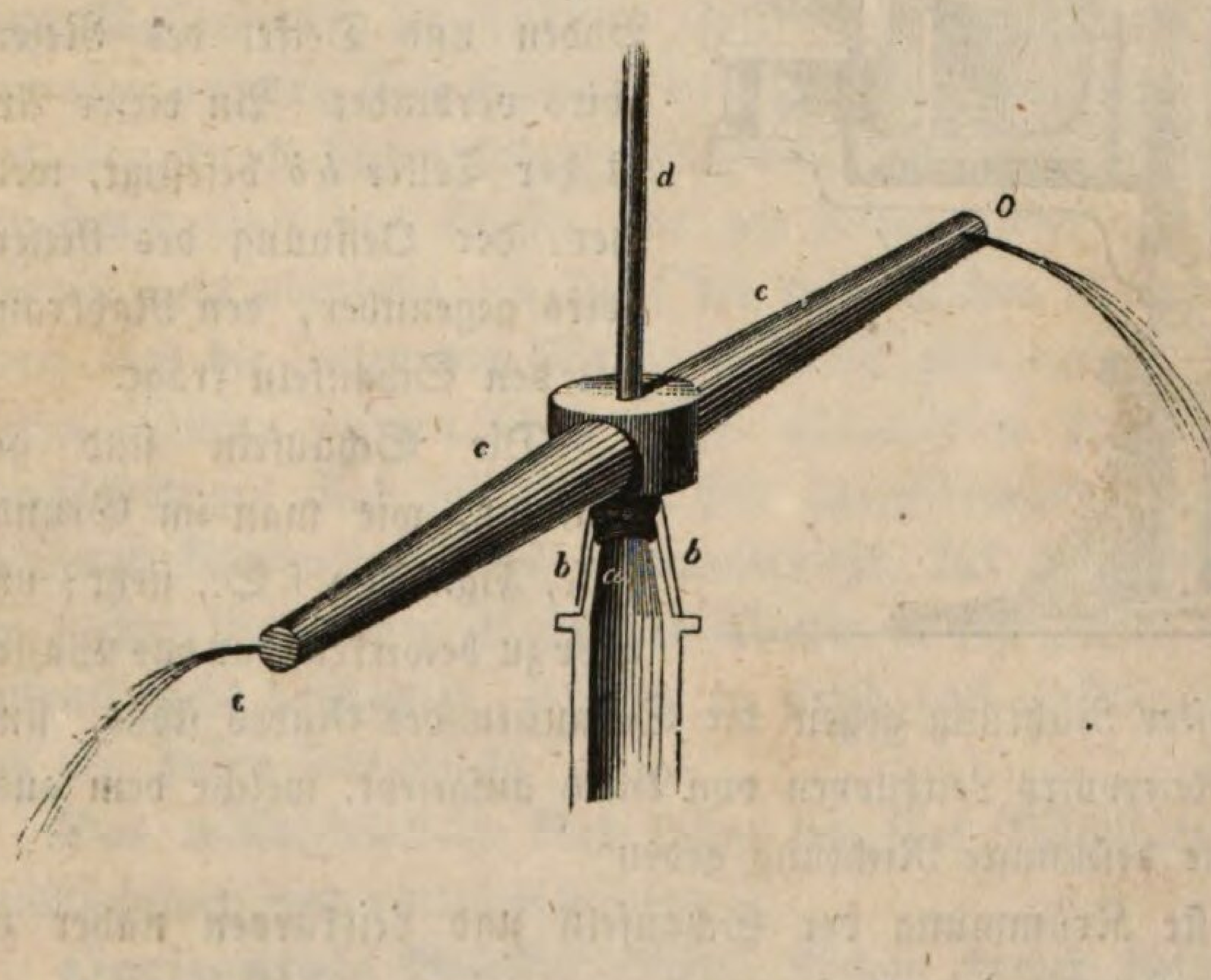
Schon früher hatte man versucht, das Segner'sche Wasserrad auch im Großen auszuführen, um Maschinen durch dasselbe zu treiben, doch ohne Erfolg; man erhielt immer nur einen sehr geringen Effect. Der Grund davon, daß diese Versuche so ungünstig ausfielen, lag keineswegs darin, daß die hier thätige, bewegende Kraft zu gering war, sondern darin, daß der untere der beiden Zapfen, um welche sich der Apparat dreht, das ganze Gewicht einer großen Wassermasse zu tragen hatte, in Folge dessen ein unverhältnißmäßig großer Reibungswiderstand zu überwinden war.

Fig. 171.



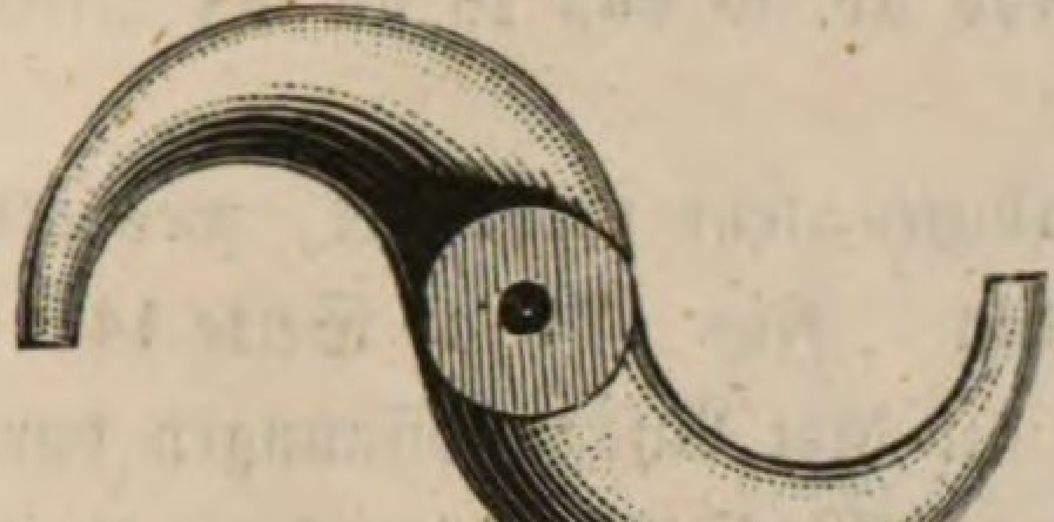
Dieser Uebelstand wird dadurch gehoben, daß man das Wasser nicht von oben, sondern von unten in die horizontalen Arme einströmen läßt. Das Wesentliche dieser Anordnung ist aus Fig. 172 zu ersehen. Das Reservoir wird durch eine gußeiserne Röhrenleitung gebildet, welche unten horizontal umgebogen ist und mit einem vertikal in die Höhe gehenden Röhrenstücke *a* endet. Aus der Oeffnung bei *a* strömt das Wasser in die Hülse *b*, welche auf dem Röhrenende *a* so sitzt, daß sie sich um

Fig. 172.



dasselbe, wie um einen Zapfen, drehen kann. Durch die Hülse *b* gelangt das Wasser in die horizontalen Arme *c* und strömt durch die Oeffnungen bei *o* aus. Die Bewegung des Rades wird durch die Axe *d* fortgepflanzt.

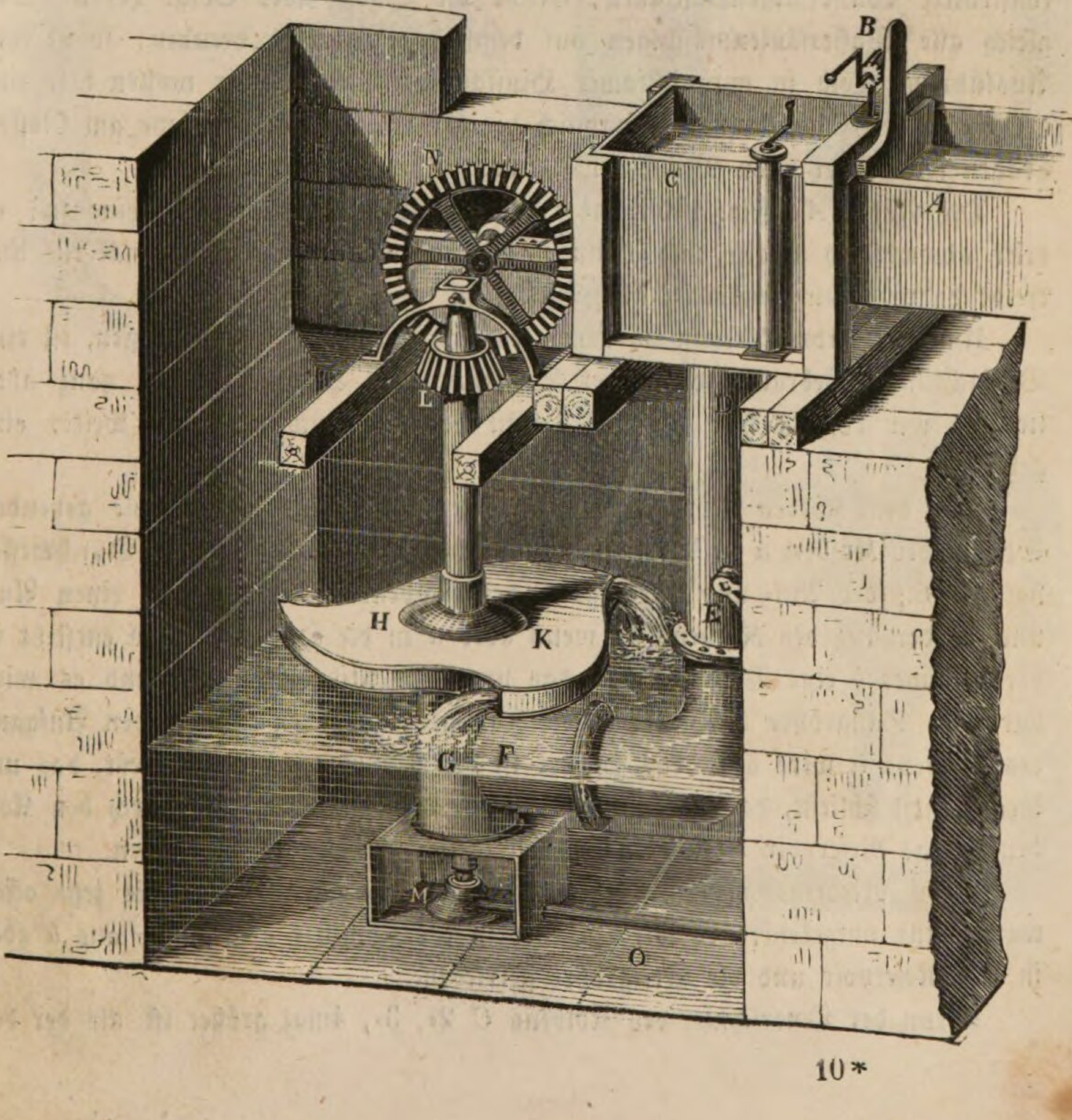
Fig. 173.



Jedenfalls ist die Reibung, welche ein solches Rad bei seiner Umdrehung um den Zapfen *a* zu überwinden hat, äußerst gering, denn das Gewicht des Rades mit Allem, was daran befestigt ist, wird fast vollständig durch den Druck der Wassersäule getragen, so daß der Zapfen *a* fast gar keinen Druck auszuhalten hat.

Bei der Einrichtung Fig. 173 muß aus ähnlichen Gründen, wie bei dem unterschlächtigen Rade, mit flachen Schaufeln ein großer Theil des mechanischen Momentes des Gefälles verloren gehen, denn wenn das Wasser seine Geschwindigkeit vollständig an das Rad abtreten und aus den Oeffnungen ohne Geschwindigkeit abfallen, wenn also das Rad mit einer der Fallhöhe entsprechenden Geschwindigkeit rotiren soll, so ist der Druck gegen die Rückwand, also auch

Fig. 174.



der mechanische Effect, Null; das Wasser muß also noch einen Theil seiner Geschwindigkeit behalten. Auch hier läßt sich durch Krümmung der Arme, deren Gestalt ungefähr die in Fig. 173 verzeichnete ist, viel gewinnen. Das Wasser tritt, durch das Rohr strömend und gegen die gekrümmten Wände drückend, seine Geschwindigkeit nach und nach an das Rad ab, so daß es an der Oeffnung fast ohne Geschwindigkeit abfällt.

In Schottland sind solche Reactionsturbinen sehr verbreitet, weshalb sie auch schottische Turbinen genannt werden. Fig. 174 a. Seite 147 stellt eine praktisch ausgeführte schottische Turbine mit drei Ausflußöffnungen dar.

85 **Die Wassersäulenmaschine.** Bei der Wassersäulenmaschine theilt die wirkende Wassersäule, das Aufschlagwasser, gegen einen in einem Cylinder beweglichen Kolben drückend, demselben eine hin- und hergehende Bewegung mit, die dann von dem Kolben aus weiter fortgepflanzt wird.

In der Regel werden die Wassersäulenmaschinen angewendet, um Wasser auf eine bedeutende Höhe zu heben. So wird z. B. die Salzsoole von Reichenhall in Oberbaiern auf Umwegen 30 Stunden weit nach Rosenheim geleitet, um hier, sowie an einigen Zwischenorten, z. B. in Trauenstein, versotten zu werden. Auf diesem Wege befinden sich neun, sämmtlich von Reichenbach construirte Wassersäulenmaschinen, welche die Soole über Berge heben. Obgleich alle Wassersäulenmaschinen auf demselben Principe beruhen, so ist ihre Ausführung doch in mannichfacher Hinsicht verschieden; wir wollen hier eine der einfachsten Einrichtungen, nämlich die der Wassersäulenmaschine am Nesselgraben (eine jener neun Maschinen), etwas näher betrachten.

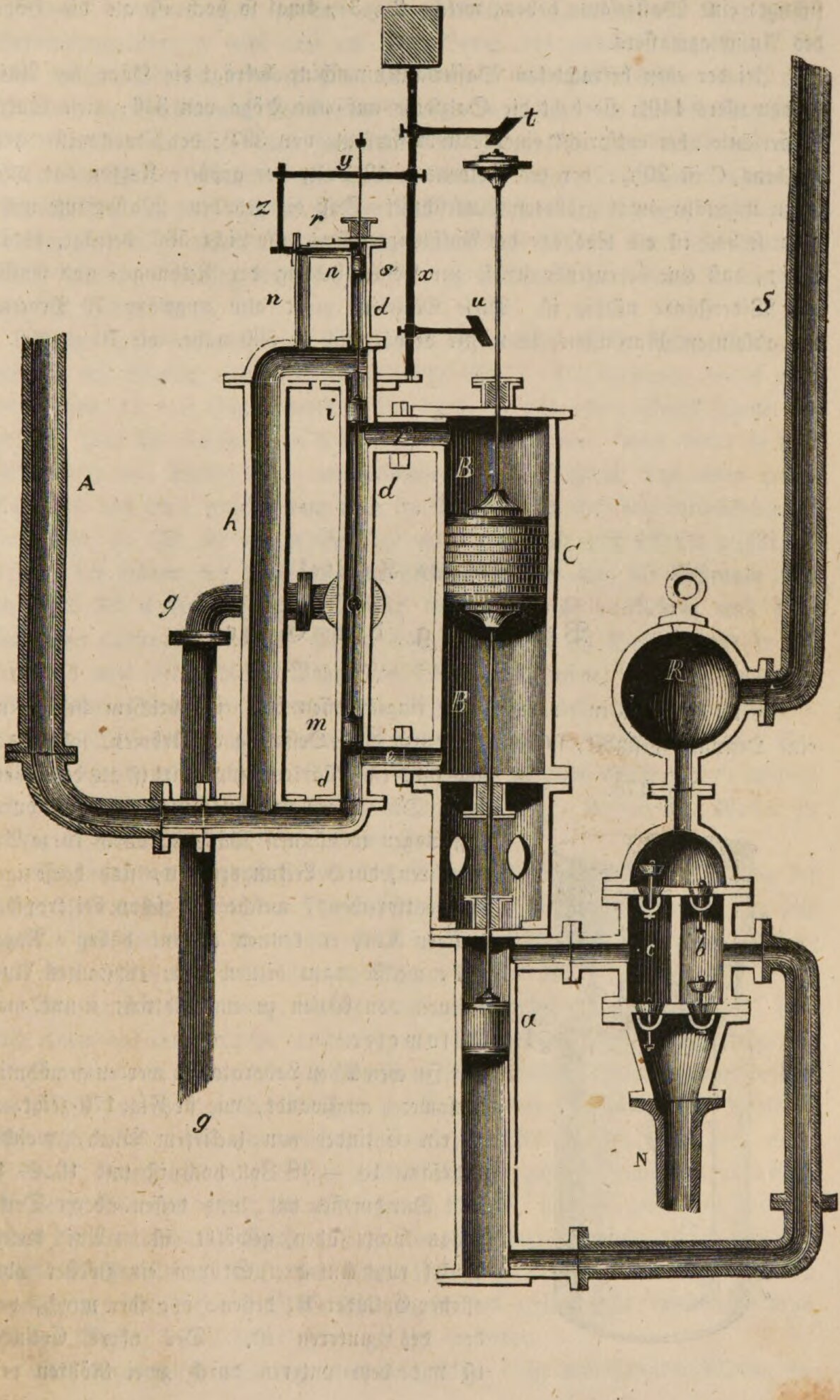
Die Röhre *A*, Fig. 175, führt das Aufschlagwasser der Maschine zu; es tritt abwechselnd unten und dann wieder oben in den Cylinder *B* ein und treibt dadurch den Kolben *C* abwechselnd auf und nieder.

Um diese Abwechselung im Eintreten des Wassers hervorzubringen, ist eine Vorrichtung angebracht, welche der Steuerung bei Dampfmaschinen ganz ähnlich ist; wir können hier auf das Detail dieser Einrichtung nicht weiter eingehen.

Mit dem Kolben *C* ist vermittelst einer durch eine Stopfbüchse gehenden Stange der Kolben *a* in Verbindung, welcher einen weit kleineren Durchmesser hat als *C*; der Auf- und Niedergang des Kolbens *C* bewirkt also einen Auf- und Niedergang des Kolbens *a*; wenn aber *a* in die Höhe geht, so entsteht in der Kammer *b* eine Verdünnung, das untere Ventil öffnet sich, und es wird durch die Saugröhre *N* Wasser in die Kammer *b* gehoben. Durch den Aufgang des Kolbens *a* wird aber das Wasser in die Kammer *e* hineingepreßt, das untere Ventil schließt, das obere öffnet sich, das Wasser wird also durch den Kolben in das Reservoir *R* und aus diesem in die Steigröhre *S* gehoben.

Beim Niedergange des Kolbens schließen sich die Ventile, die jetzt offen waren, und umgekehrt; es wird Wasser in der Kammer *e* gesaugt, aus *b* aber in das Reservoir und die Steigröhre getrieben.

Wenn der Querschnitt des Kolbens *C* 2-, 3-, 4mal größer ist als der des


t
y
z
r
n
s
x
n
d
u
S
i
B
A
d
h
C
g
R
B
m
d
e
c
b
a
g
N

Kolbens *a*, so kann man (die Reibungs- und sonstigen Widerstände unberücksichtigt) eine Wassersäule heben, welche 2-, 3-, 4mal so hoch ist als die Höhe des Aufschlagwassers.

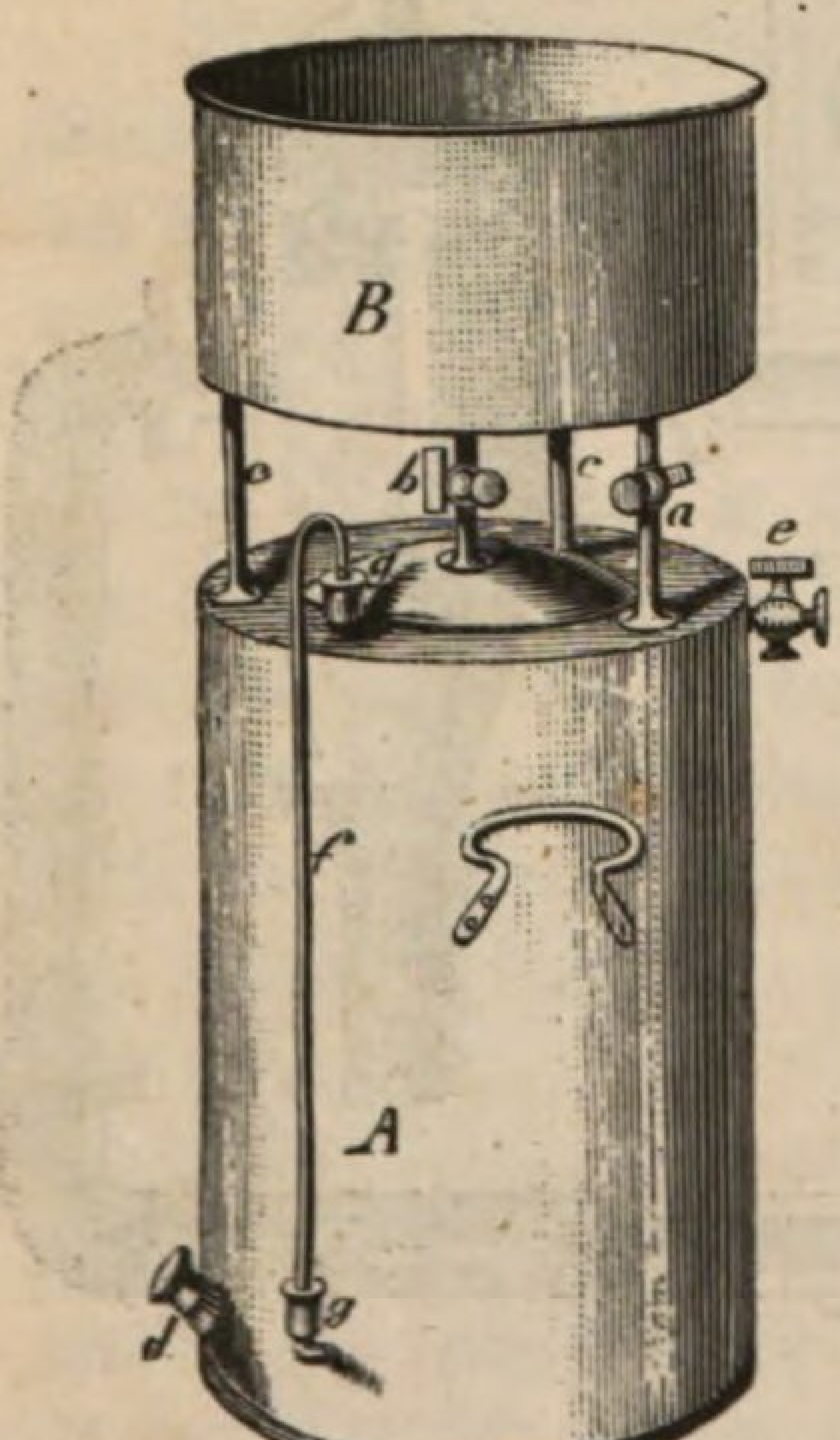
Bei der eben betrachteten Wassersäulenmaschine beträgt die Höhe des Aufschlagwassers 140′; sie hebt die Salzsoole auf eine Höhe von 346; diese Salzwassersäule aber entspricht einer Süßwassersäule von 397′; der Durchmesser des Kolbens *C* ist 20½, der des Kolbens *a* 10 Zoll, der größere Kolben hat also einen ungefähr 4mal größeren Querschnitt. Daß die gehobene Wassersäule nicht 4mal so hoch ist als die Höhe des Aufschlagwassers, also nicht 560′ beträgt, rührt daher, daß eine bedeutende Kraft zur Ueberwindung der Reibungs- und sonstigen Widerstände nöthig ist. Diese Maschine giebt also ungefähr 70 Procent des absoluten Maximums, denn 397 verhält sich zu 560 nahe, wie 70 zu 100.

Drittes Kapitel.

Bewegung der Gase.

86 Wenn ein Gas in einem Gefäße eingeschlossen ist, in welchem sich irgend eine Oeffnung befindet, so wird es durch diese Oeffnung ausströmen, sobald das Gas im Gefäße stärker comprimirt ist als die äußere Luft. Die Gesetze des Ausflusses der Gase durch Oeffnungen in dünnen Wänden, durch kurze Ansatzröhren, durch Leitungsröhren, sind denjenigen ganz entsprechend, welche wir schon bei tropfbar flüssigen Körpern kennen gelernt haben. Apparate, welche dazu dienen, ein constantes Ausströmen von Gasen zu unterhalten, nennt man Gasometer.

Fig. 176.



In chemischen Laboratorien werden gewöhnlich Gasometer angewandt, wie sie Fig. 176 zeigt. *A* ist ein Cylinder von lackirtem Blech, welcher ungefähr 16 — 18 Zoll hoch ist und 10 — 12 Zoll Durchmesser hat, und dessen oberer Deckel etwas nach oben gewölbt ist. Auf diesem Deckel ruht auf drei Stützen ein zweiter oben offener Cylinder *B*, dessen Höhe aber nur ⅓ von der des unteren ist. Der obere Cylinder ist mit dem unteren durch zwei Röhren ver-

bunden, von denen die eine, *b*, gerade in der Mitte des Deckels sich befindet. Sie darf durchaus nicht in den unteren Cylinder hineinragen. Eine zweite Verbindungsröhre *a* geht fast auf den Boden des unteren Cylinders. In jeder dieser Röhren befindet sich ein Hahn, vermittelst dessen man nach Belieben die Verbindung der beiden Cylinder herstellen und unterbrechen kann. Bei *e* befindet sich eine kurze horizontale Röhre, welche ebenfalls durch einen Hahn verschlossen werden kann und an welcher vorn ein Schraubengewinde, eingeschnitten ist, um andere Röhren und Ausströmungsöffnungen anschrauben zu können. Nahe am Boden des unteren Cylinders befindet sich bei *d* eine aufwärts stehende Oeffnung, welche mittelst einer Schraube oder eines Korkes verschlossen werden kann.

Wenn man den unteren Cylinder mit einem Gase füllen will, füllt man ihn erst mit Wasser, und zwar auf folgende Weise. Die Oeffnung bei *d* wird verschlossen, die drei Hähne geöffnet und dann in das obere Gefäß Wasser gegossen Das Wasser fließt in den unteren Cylinder, und wenn dieser so weit gefüllt ist, daß Wasser bei *e* auszufließen beginnt, schließt man diesen Hahn. Der Rest von Luft, welcher nun noch im Cylinder sich befindet, entweicht durch das Rohr *b*. Ist der untere Cylinder auf diese Weise mit Wasser gefüllt, so werden die Hähne der Verbindungsröhren geschlossen und die Schraube oder der Kork bei *d* weggenommen. Wasser kann hier nicht ausfließen, weil keine Luftblasen eindringen können. Wenn man aber bei *d* ein Gasleitungsrohr einsteckt, so wird neben diesem Rohre das Wasser ausfließen, während aus demselben fortwährend Gasblasen in den oberen Theil des Behälters aufsteigen. Auf diese Weise füllt sich der untere Cylinder mehr und mehr mit Gas. Wie weit der Cylinder mit Gas gefüllt ist, sieht man an dem Glasrohre *f*, welches mit dem Gefäße oben und unten in Verbindung steht, so daß das Wasser in diesem Glasrohre so hoch steht wie im Cylinder.

Nachdem das ganze Reservoir mit Gas gefüllt ist, wird die Oeffnung bei *d* verschlossen, der Hahn der Verbindungsröhre *a* geöffnet. Sobald nun der Hahn *e* geöffnet wird, strömt das Gas hier mit einer dem Drucke der Wassersäule in der Röhre *a* entsprechenden Geschwindigkeit aus.

Die großen Gasometer, welche man zur Gasbeleuchtung anwendet, sind nach einem anderen Principe construirt; ein oben verschlossener Cylinder, Fig. 177 a. f. S., taucht in ein großes mit Wasser gefülltes Bassin. Dieser Cylinder besteht aus Blech und hat z. B. 30 Fuß im Durchmesser, enthält 2700 Kubikfuß Gas und wiegt, wie wir annehmen wollen, 20,000 Pfund. Er sinkt nicht in Wasser unter, weil er mit Gas gefüllt ist, sein ganzes Gewicht aber drückt auf dieses Gas und erhält es unter einem Drucke, welcher größer ist als der Druck der Atmosphäre. Nach unserer Annahme beträgt dieser Ueberschuß des Drucks 20,000 Pfund auf eine Kreisfläche von 30 Fuß Durchmesser, was ungefähr dem Drucke einer Wassersäule von 5 Zoll gleichkommt; außerhalb muß also das Wasser 5 Zoll höher stehen als im Cylinder.

Von unten aufsteigend ragt nun eine Röhre *t'* in den Cylinder hinein, so

daß ihr oberes offenes Ende über dem Wasserspiegel sich befindet; diese Röhre vertheilt sich in eine Menge engerer Röhren, die zu den einzelnen Gasschnäbeln

Fig. 177.

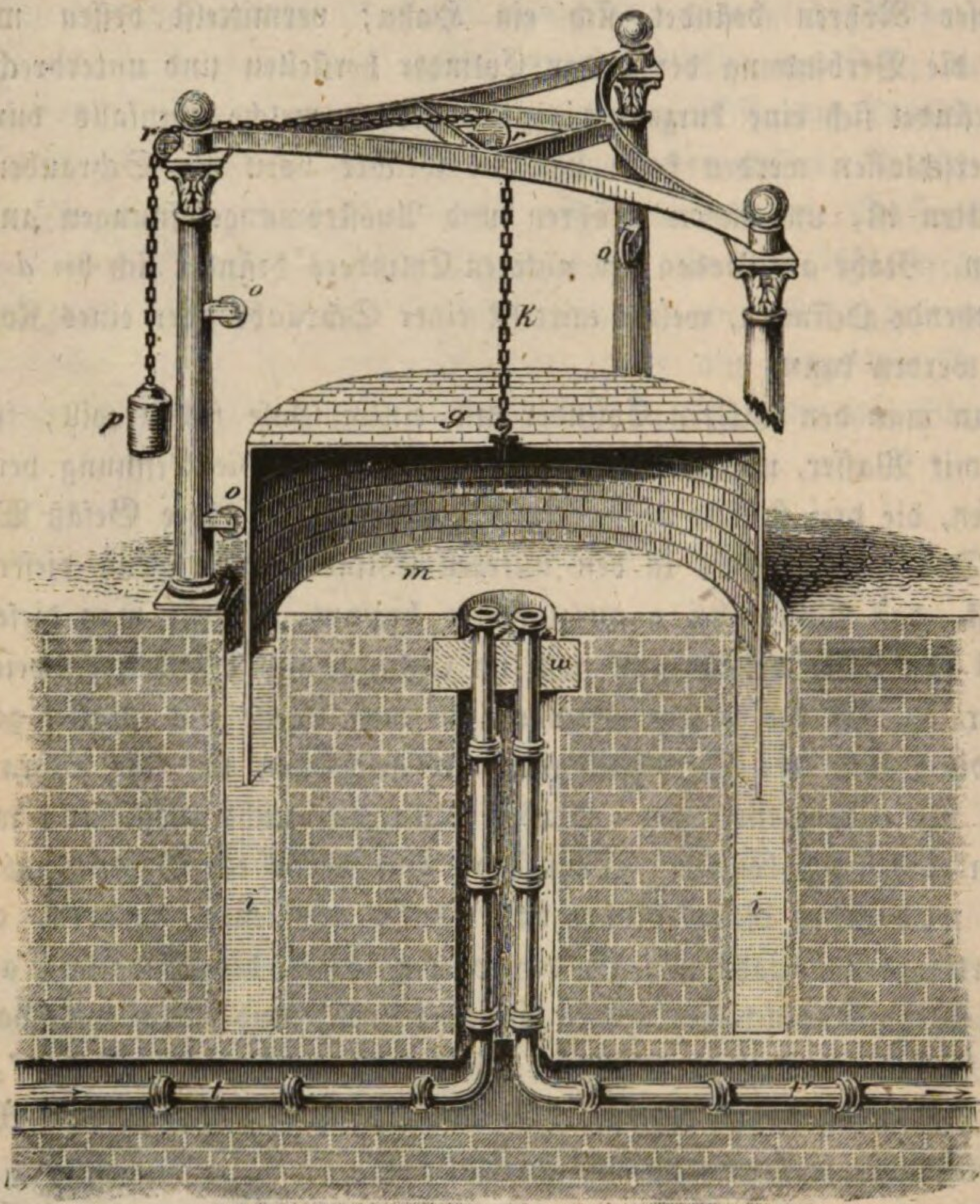
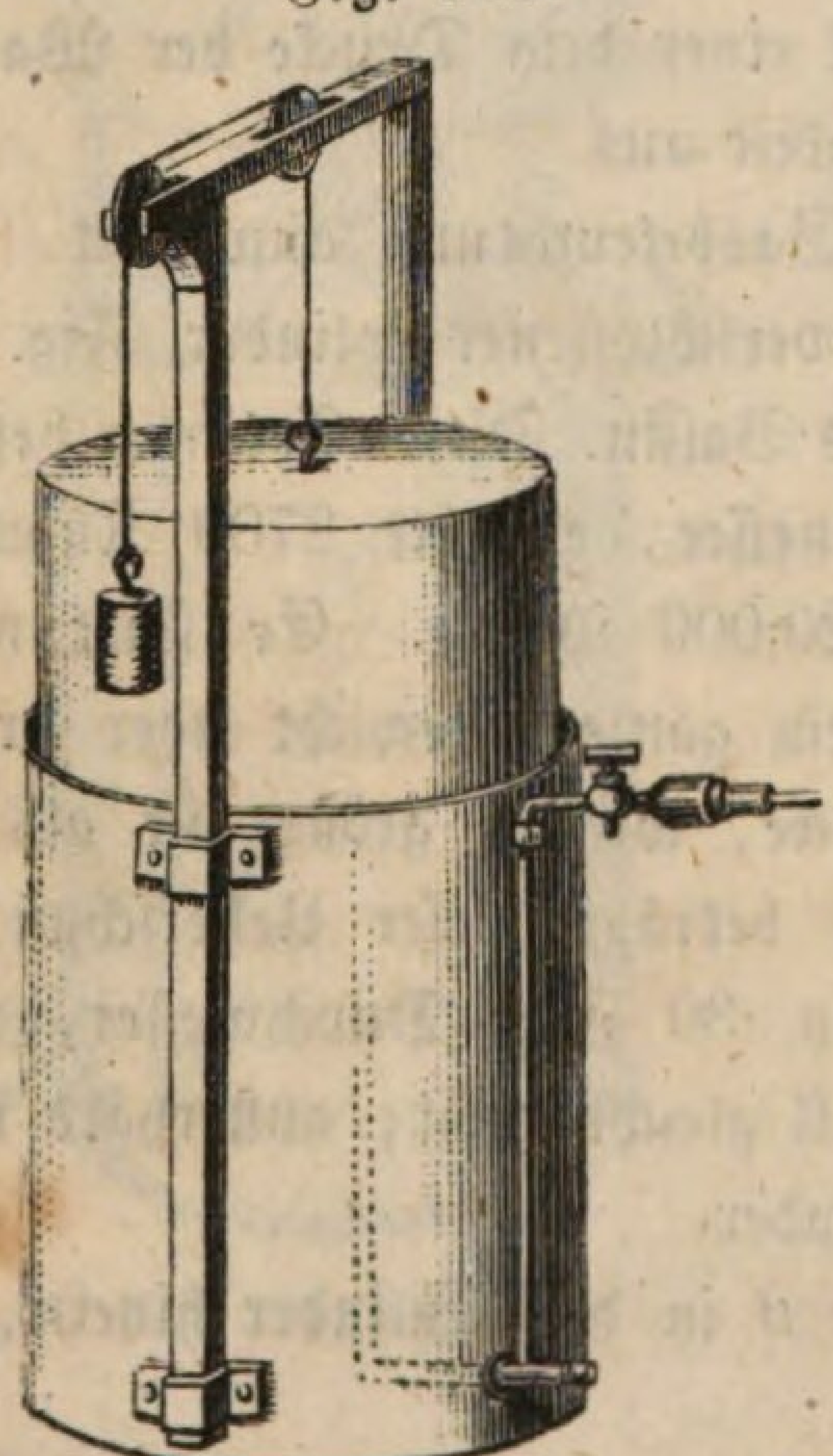


Fig. 178.

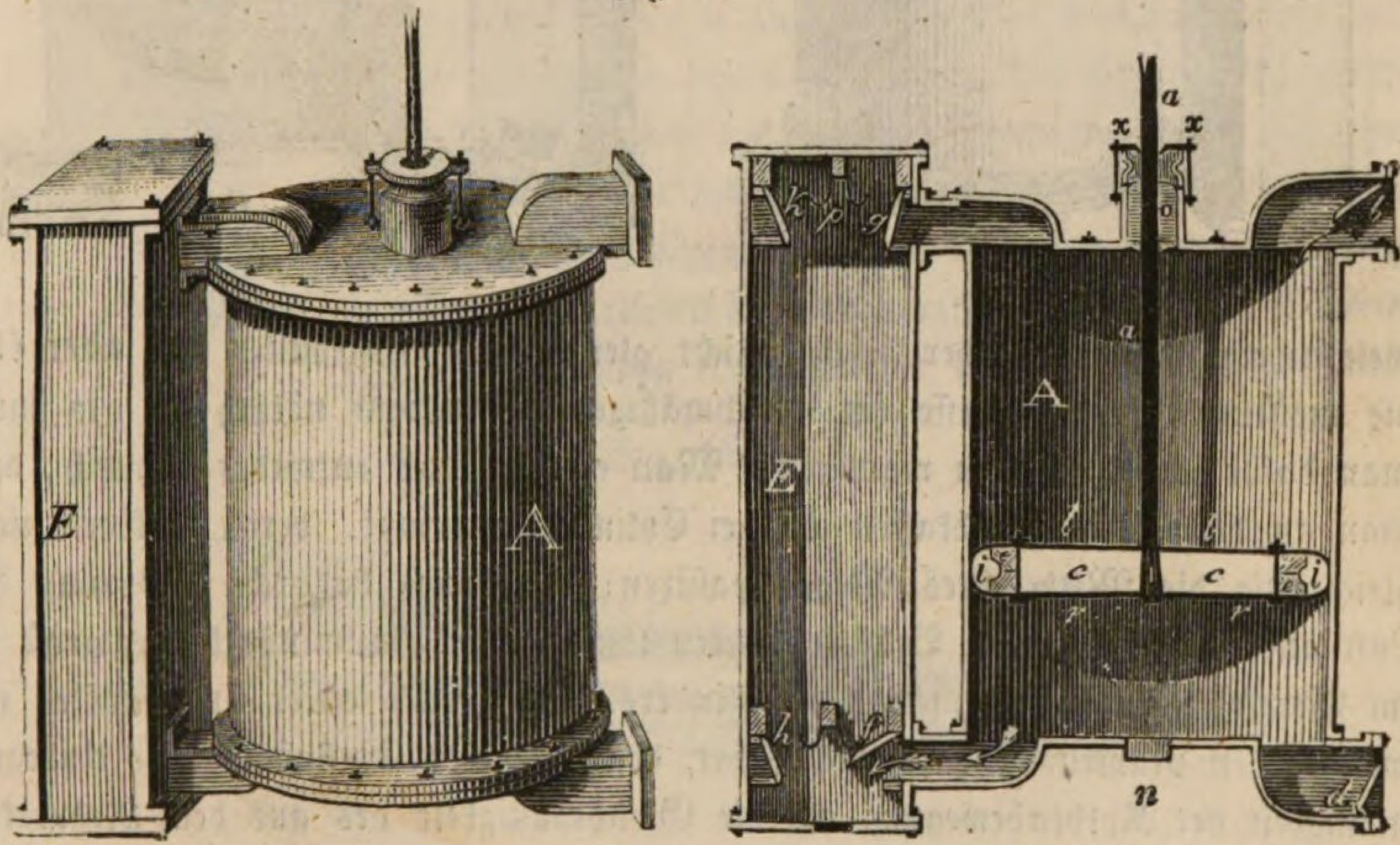


führen, aus denen dann das Gas mit einer Geschwindigkeit ausströmt, welche dem Drucke im Gasometer entspricht. Diese Geschwindigkeit ist constant, weil das Gasometer, wenn es auch tiefer ins Wasser einsinkt, doch nur wenig von seinem Gewichte verliert, indem hier nur die Wand des Gasometers in Betracht kommt. Der Druck auf das Gas wird durch ein Gegengewicht gemäßigt und regelmäßiger gemacht. Um das Gasometer zu füllen, wird ein im Vertheilungsrohre *t'* befindlicher Hahn geschlossen, dagegen aber der Hahn des Rohrs *t* geöffnet, welches das Innere des Gasometers mit dem Apparate verbindet, in welchem das Gas bereitet wird.

Nach demselben Princip werden auch kleinere Gasometer für Laboratorien construirt. In Fig. 178 ist ein solcher abgebildet und wohl ohne weitere Erklärung verständlich. Es ist hier nur eine Zuleitungsröhre, aus welcher man dann das Gas auch wieder ausströmen läßt. In derselben Weise könnten 2 solcher Röhren angebracht seyn.

Gebläse. Bei Hohöfen und Schmiedefeuern wendet man Gebläse von 87
verschiedener Einrichtung an. Die vollkommenste derselben ist das Cylindergebläse, welches Fig. 179 abgebildet ist. In einem wohl ausgebohrten gußeisernen Cylinder *A*, in welchem ein Kolben *C*, an den Wänden luftdicht schließend, auf und nieder bewegt werden kann, geht die Kolbenstange *a* luftdicht durch die in der Mitte des oberen Deckels befindliche Stopfbüchse. Durch die Oeffnung bei *b* communicirt der obere, durch die Oeffnung bei *d* der untere Theil des Cylinders mit der freien Luft; die Oeffnungen bei *g* und *f* aber verbinden den Cylinder mit einem viereckigen Kasten *E*. Bei *b* und *d* befinden sich Klappen, die sich nach innen, bei *g* und *f* aber solche, die sich nach außen öffnen. Wenn nun der Kolben niedergeht, schließt sich die Klappe bei *d*, die bei *f* aber öffnet sich, und alle Luft aus dem unteren Theile des Cylinders wird in den Raum *E* getrieben. Unterdessen dringt aber durch die Klappe bei *b* Luft von außen her in den oberen Theil des Cylinders. Wenn der Kolben wieder in die Höhe geht, schließt sich *b*, und alle Luft, die beim Niedergang des Kolbens hier eingedrungen war, wird durch die Oeffnung bei *g* in den Kasten *E* geschafft, während *f* geschlossen ist und sich der untere Theil des Cylinders wieder durch die geöffnete Klappe *d* mit Luft füllt. Die in *E* comprimirte Luft strömt durch ein am unteren Ende von *E* befestigtes Rohr nach dem Feuerraume.

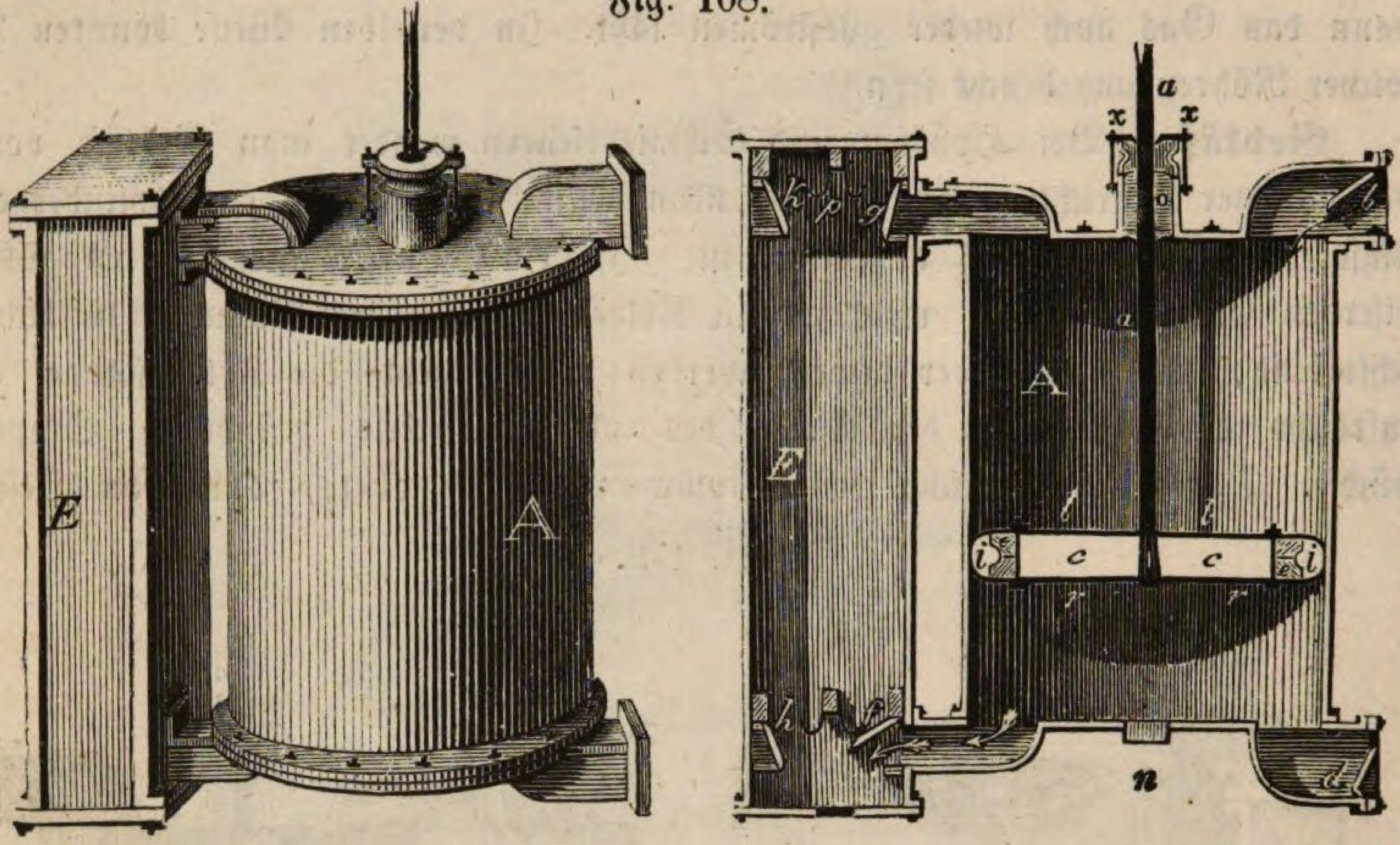
Fig. 179.



Die Geschwindigkeit des Kolbens ist am größten, wenn er die Mitte des

Cylinders passirt, sie nimmt um so mehr ab, je mehr er sich der oberen oder unteren Gränze seines Weges nähert. Daraus geht hervor, daß der Wind,

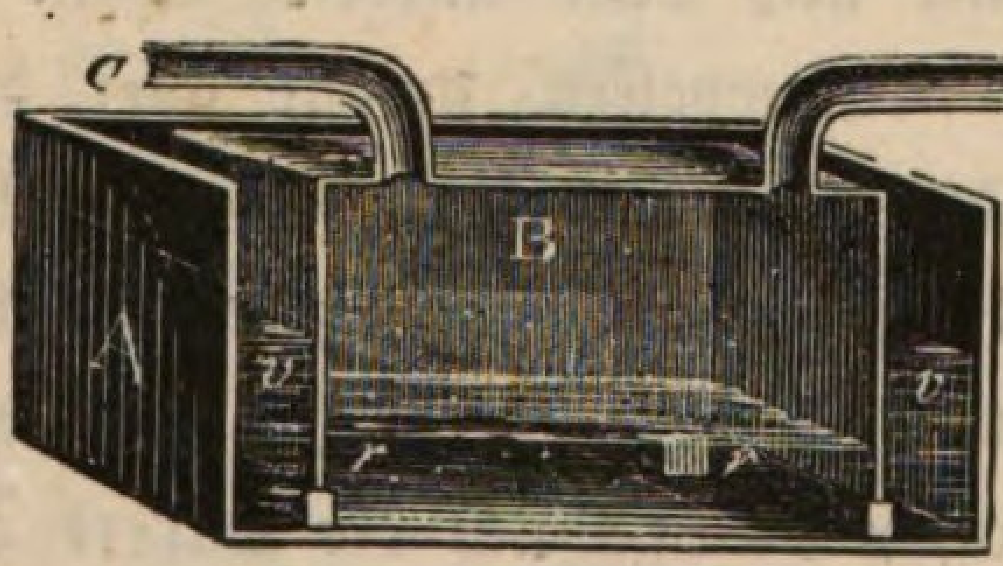
Fig. 108.



welchen ein solcher Cylinder liefert, nicht gleichmäßig ausströmt. Da aber für die meisten Schmelzprocesse ein gleichmäßiger Windstrom nöthig ist, so muß man dafür sorgen, ihn zu reguliren. Man erreicht dies entweder dadurch, daß man an demselben Windkasten *E* drei Cylinder anbringt, deren Kolben nicht gleichzeitig die Mitte ihres Weges passiren; oder auch dadurch, daß man die Luft aus *E* erst in einen Behälter treten läßt, dessen Rauminhalt sehr groß ist im Vergleich zum Volumen des Cylinders. Je größer dieser Luftbehälter ist, welcher den Namen **Regulator** führt, desto weniger Einfluß hat die Unregelmäßigkeit der Kolbenbewegung auf die Gleichmäßigkeit des aus dem Regulator austretenden Luftstromes.

Als Regulator bei Gebläsen wendet man entweder einen aus Eisenblech luftdicht zusammengenieteten Ballon an, dessen Inhalt 40- bis 50mal so groß ist als der des Cylinders, oder den Fig. 181 abgebildeten Wasserregulator, der

Fig. 181.



seinem Wesen nach ganz mit dem Gasometer übereinkommt, wie er zur Gasbeleuchtung angewendet wird. In den Kasten *B*, welcher aus luftdicht zusammengeschraubten eisernen Platten besteht, und dessen Inhalt den des Cylinders weit übertrifft, strömt durch das Rohr *D* vom Cylinder her die Luft ein, durch das Rohr *C* aber wieder aus. Die Luft im Kasten *B* ist unten durch Wasser gesperrt, dessen Niveau *r r* im Kasten nothwendig tiefer steht als der Spiegel *v v* außerhalb. Von der Differenz der Höhen der Wasserspiegel hängt der Grad der

Compression der Luft in *B* und also auch die Geschwindigkeit des Ausflusses durch das Rohr *C* ab.

Um den Druck zu messen, welchem die Gase in den verschiedenen Behältern und Gasleitungsröhren ausgesetzt sind, bedient man sich der **Manometer**, welche bei Gebläsen auch den Namen der **Windmesser** führen.

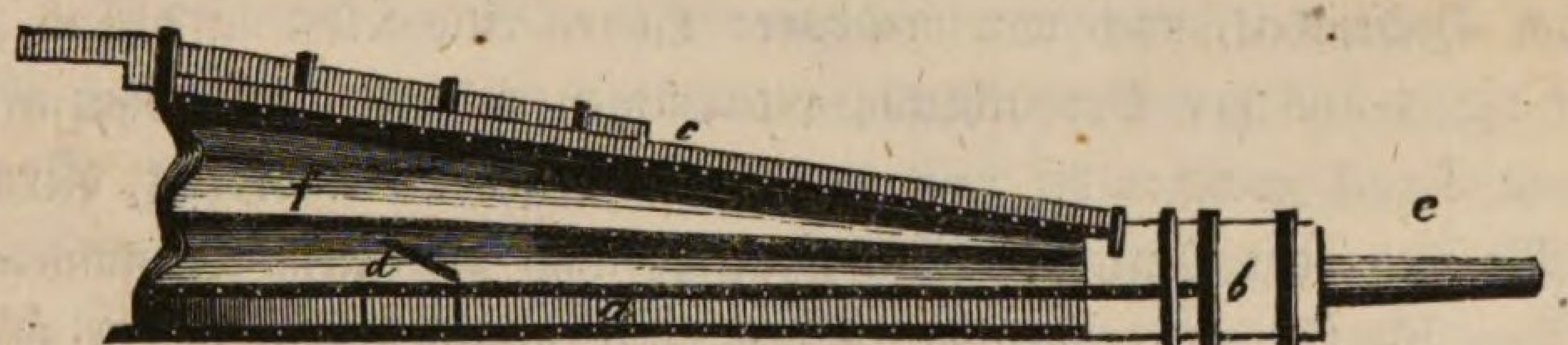
Fig. 182.



Fig. 182 stellt ein einfaches Manometer dar; es besteht aus einer doppelt gebogenen Glasröhre, deren Schenkel 6 bis 7 Zoll lang sind und welcher in eine Messingfassung eingekittet ist, die an einer entsprechenden Stelle der Gasleitung aufgeschraubt werden kann.

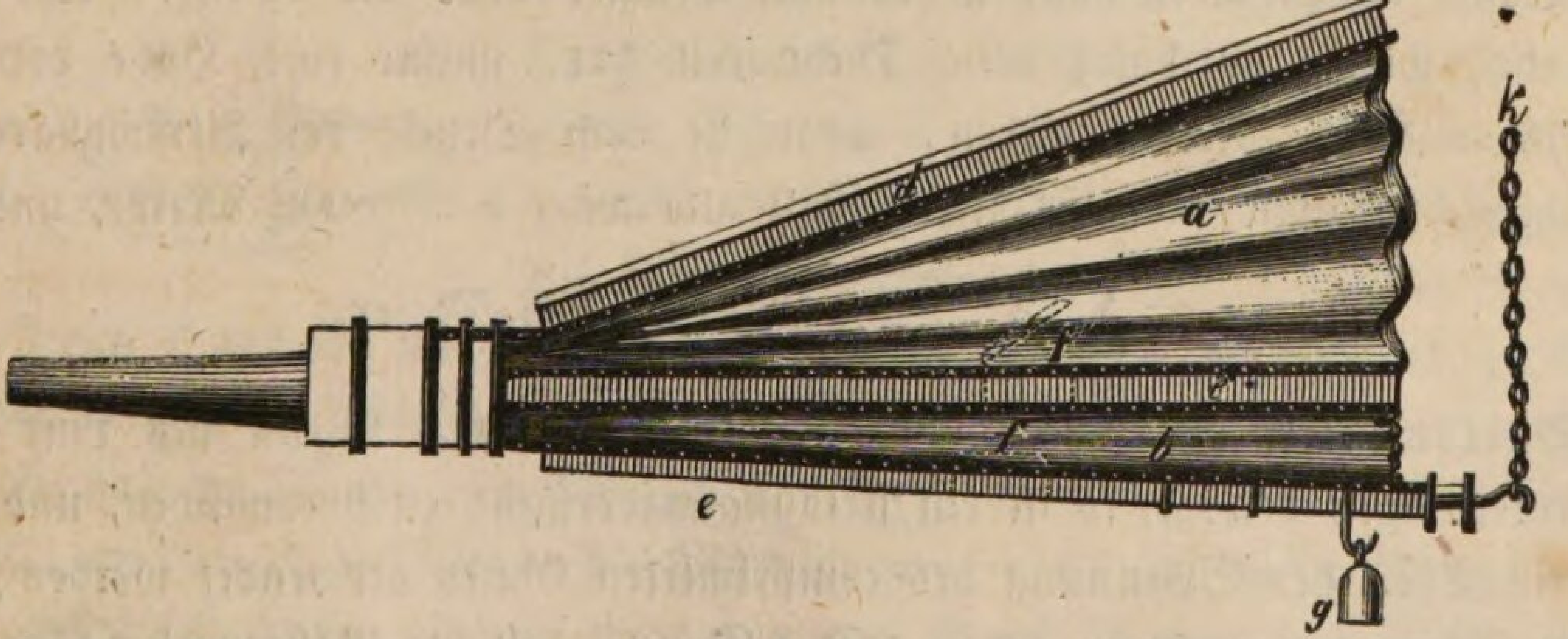
Der **Blasbalg** in seiner einfachsten Gestalt ist in Fig. 183 abgebildet. Beim Aufziehen des Deckels *c* hebt sich das im Boden *a* angebrachte Ventil *d*, es dringt von außen her Luft in den inneren Raum des Blasbalges, welche beim Niederdrücken des Deckels durch die Düse *e* ausgetrieben wird, weil sich bei diesem Niederdrücken die Klappe *p* schließt. Mit einem einfachen Blasbalg kann man aber keinen continuirlichen Luftstrom erzeugen, wie dies in Schmieden, in chemischen Laboratorien u. s. w. nöthig ist; man

Fig. 183.



wendet in diesem Falle zusammengesetzte Blasbälge an, welche construirt sind, wie Fig. 184 zeigt. Wenn die obere Abtheilung *a* eines solchen Blasebalges mit Luft gefüllt ist, die durch Gewichte, welche auf dem oberen Deckel liegen, comprimirt wird, so kann sie nur durch die Düse entweichen, denn das

Fig. 184.



Ventil *f* zwischen *a* und *b* schließt sich, sobald die Luft in *a* stärker comprimirt ist als in *b*. Wenn man die untere Platte des Raumes *b* hebt, so wird die Luft in *b* comprimirt, sie hebt das nach *a* führende Ventil *f* und dringt in den oberen Raum. Beim Niedergange der untersten Platte schließt sich das Ventil *f* wieder, das Ventil, welches aus *b* in die freie Luft führt, öffnet sich, und *b* füllt sich von Neuem mit Luft, welche durch Aufziehen der untersten Platte abermals in den oberen Raum geschafft wird. Man begreift leicht, daß das Ausströmen der Luft aus *a* durch die Düse nicht unterbrochen wird, während *b* von Neuem sich mit Luft füllt.

88 **Gesetze des Ausströmens der Gase.** Für die Ausflußgeschwindigkeit der Gase gelten dieselben Gesetze wie bei Flüssigkeiten, d. h. die Ausflußgeschwindigkeit ist

$$c = \sqrt{2gs},$$

wenn s die Druckhöhe bezeichnet. Hier aber ist s eine Größe, die nicht direct durch die Beobachtung gegeben ist, wie bei tropfbar flüssigen Körpern. Für diese bezeichnet s die Höhe der Flüssigkeitssäule, deren Druck den Ausfluß bewirkt, und welche von derselben Natur und Dichtigkeit ist wie die ausströmende Flüssigkeit. Gase, welche in einem Gefäße enthalten sind, sind aber nie durch eine Luftsäule von gleichmäßiger Dichtigkeit und wohlbegränzter Höhe comprimirt, denn selbst wenn das Gas nur durch den Druck der Atmosphäre comprimirt wäre, ist die Luftsäule, welche diesen Druck hervorbringt, weder von gleichförmiger Dichtigkeit, noch von meßbarer Höhe. Also selbst in diesem Falle kann s nicht direct aus der Beobachtung entnommen werden. Gewöhnlich aber mißt man den Druck, welcher die Luft aus einem Reservoir austreibt, durch die Höhe einer Wasser- oder Quecksilbersäule, welche man an einem Manometer beobachtet. Der Werth von s, welcher in den oben angegebenen Werth der Ausflußgeschwindigkeit gesetzt werden muß, ist also jederzeit aus den beobachteten Umständen zu berechnen.

Der einfachste Fall, der hier in Betrachtung kommen kann, ist der, daß Luft von atmosphärischer Pressung in einen luftleeren Raum einströmt. Der mittlere atmosphärische Druck hält einer Wassersäule von 32 Fuß oder 10,4 Metern das Gleichgewicht. Die Dichtigkeit der Luft aber, welche diesen mittleren Druck auszuhalten hat, ist 770mal weniger dicht als Wasser; eine Luftsäule also, welche durchweg diese Dichtigkeit hat, müßte eine Höhe von 770 $\times$ 10,4 = 8008 Metern haben, wenn sie dem Drucke der Atmosphäre das Gleichgewicht halten soll; für diesen Fall also wäre s = 8008 Meter, und also

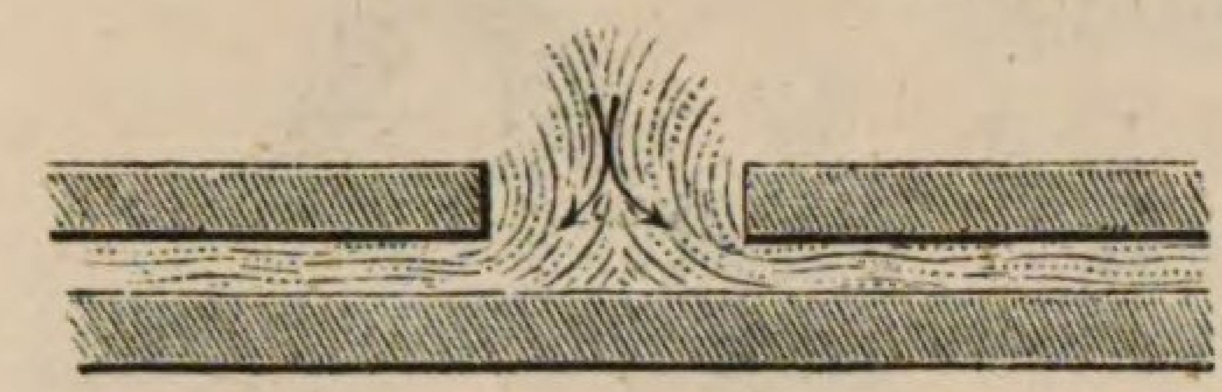
$$c = \sqrt{2 \,.\, 9{,}8 \,.\, 8008} = 396 \text{ Meter.}$$

89 **Seitendruck der Gase beim Ausströmen.** Wenn sich Luft durch Röhrenleitungen bewegt, so ist ein Reibungswiderstand zu überwinden, und dazu wird ein Theil der Spannung des comprimirten Gases verwendet werden, also für die Bewegung verloren gehen. Der Druck, den die Röhrenwände von der

Tension der durchströmenden Luft auszuhalten haben, nimmt um so mehr ab, je mehr man sich der Mündung des Rohres nähert, wie man sich durch Manometer überzeugt, welche an verschiedenen Stellen des Rohres angebracht werden. Es ist dies ganz den Erscheinungen analog, welche man bei der Bewegung von Flüssigkeiten durch Röhrenleitungen beobachtet.

Das Phänomen des Saugens findet bei der Bewegung der Gase auf ganz ähnliche Weise Statt wie beim Ausströmen von Flüssigkeiten. Wenn man in den Boden eines Gefäßes, welches comprimirte Luft enthält, eine Oeffnung von 1 bis 2 Zoll Durchmesser macht, so entweicht die Luft mit großer Gewalt. Wenn man der Oeffnung eine Scheibe von Holz oder Metall nähert, welche 7 bis 8 Zoll Durchmesser hat, so wird sie, nachdem der erste Widerstand überwunden ist, nicht mehr abgestoßen; sie oscillirt lebhaft, indem sie in sehr kurzen Zwischenräumen sich der Oeffnung bald nähert, bald von ihr entfernt. Die Luft entweicht dabei mit großem Geräusch zwischen der Scheibe und der Wand. Wenn man versucht, die Scheibe wegzunehmen, so muß man große Kraft anwenden, wie wenn sie auf die Wand festgeleimt wäre.

Fig. 185.



Man erklärt diese Erscheinung folgendermaßen: Der Luftstrahl, welcher die Oeffnung verläßt, muß sich in eine dünne Schicht zwischen der Scheibe und der Wand ausbreiten, Fig. 185. Bei unveränderter Dicke muß sie sich nun um so mehr ausbreiten, je mehr sie sich dem Rande der Scheibe nähert; sie befindet sich also in demselben Falle wie ein flüssiger Strahl, welcher die immer wachsenden Querschnitte eines conischen Ansatzrohres ausfüllen soll. Zwischen der Scheibe und der Wand bildet sich ein luftverdünnter Raum, in Folge dessen die atmosphärische Luft, von unten gegen die Scheibe drückend, sie an die Wand anpreßt.

Man kann diesen Versuch auch im Kleinen mittelst des Apparates Fig. 186 anstellen, wenn man Luft mit dem Munde durch die Röhre *a b* bläst, welche mit einer ebenen Scheibe endigt; die der oberen Scheibe, welche an der Röhre *a b* befestigt ist, gegenüberliegende, nach oben frei bewegliche Scheibe von Kartenpapier steigt in die Höhe und haftet an der oberen Scheibe, so lange man mit Blasen fortfährt.

Fig. 186.



Die einfachste Art, diesen Versuch anzustellen, hat Faraday angegeben. Man schließe die Finger der offenen Hand fest an einander, so wird doch noch von Gelenk zu Gelenk ein spaltartiger Zwischenraum bleiben. Während man nun die Hand horizontal hält, so daß die Fläche abwärts gekehrt ist, applicire man die Lippen dem Intervall zwischen dem Zeige- und Mittelfinger, nahe an ihren Wurzeln, und blase möglichst stark. Bringt man nun ein Stück Papier von 3 bis 4 Qua-

dratzoll an die Oeffnung, durch welche der Luftstrom hindurchgeht, so wird es weder durch diesen Luftstrom fortgeblasen, noch fällt es durch sein Gewicht herab, was aber sogleich geschieht, sobald man mit Blasen aufhört.

Vierter Abschnitt.

Akustik.

Erstes Kapitel.

Gesetze der Wellenbewegung im Allgemeinen und der Schallwellen insbesondere.

90 **Vibrationsbewegung.** Wenn ein Pendel aus seiner Gleichgewichtslage herausgebracht wird und dann sich selbst überlassen bleibt, so wird es zunächst durch die Schwere seiner Gleichgewichtslage wieder zugeführt; in derselben angelangt, kann es aber nicht in Ruhe bleiben, weil es mit einer Geschwindigkeit ankommt, die es über die Gleichgewichtslage hinaustreibt, und so macht denn das Pendel eine Reihe von Schwingungen, deren Gesetze wir schon oben betrachtet haben.

Bei der Bewegung des Pendels bleibt die gegenseitige Lage der Theilchen desselben unverändert. Wenn aber die gegenseitige Lage der einzelnen Theilchen eines Körpers durch irgend eine äußere Ursache gestört wird, so werden dieselben, wenn irgend Kräfte vorhanden sind, welche die ursprüngliche Gleichgewichtslage wiederherzustellen streben, ebenfalls in eine oscillatorische Bewegung gerathen, welche sich von der Pendelbewegung wesentlich dadurch unterscheidet, daß sich die gegenseitige Lage der Partikelchen mit jedem Momente ändert; man hat also hier nicht allein die Oscillationsbewegung eines einzelnen Theilchens, sondern auch die Veränderungen in der gegenseitigen Lage der Theilchen zu betrachten.

Die Oscillationsbewegung der einzelnen Theilchen eines Körpers kann von der Art seyn, daß alle Theilchen gleichzeitig in Bewegung gerathen, gleichzeitig ihre Gleichgewichtslage passiren, gleichzeitig die Gränzen ihrer Schwingungen erreichen und dann gleichzeitig ihren Rückweg wieder beginnen. Von dieser Art

sind die Vibrationen eines an einem Ende eingeklemmten Stahlstreifens, Fig. 187, einer zwischen zwei festen Punkten ausgespannten Saite, Fig. 188. Solche Schwingungen nennt man, nach Weber, »stehende Schwingungen«.

Fig. 187.

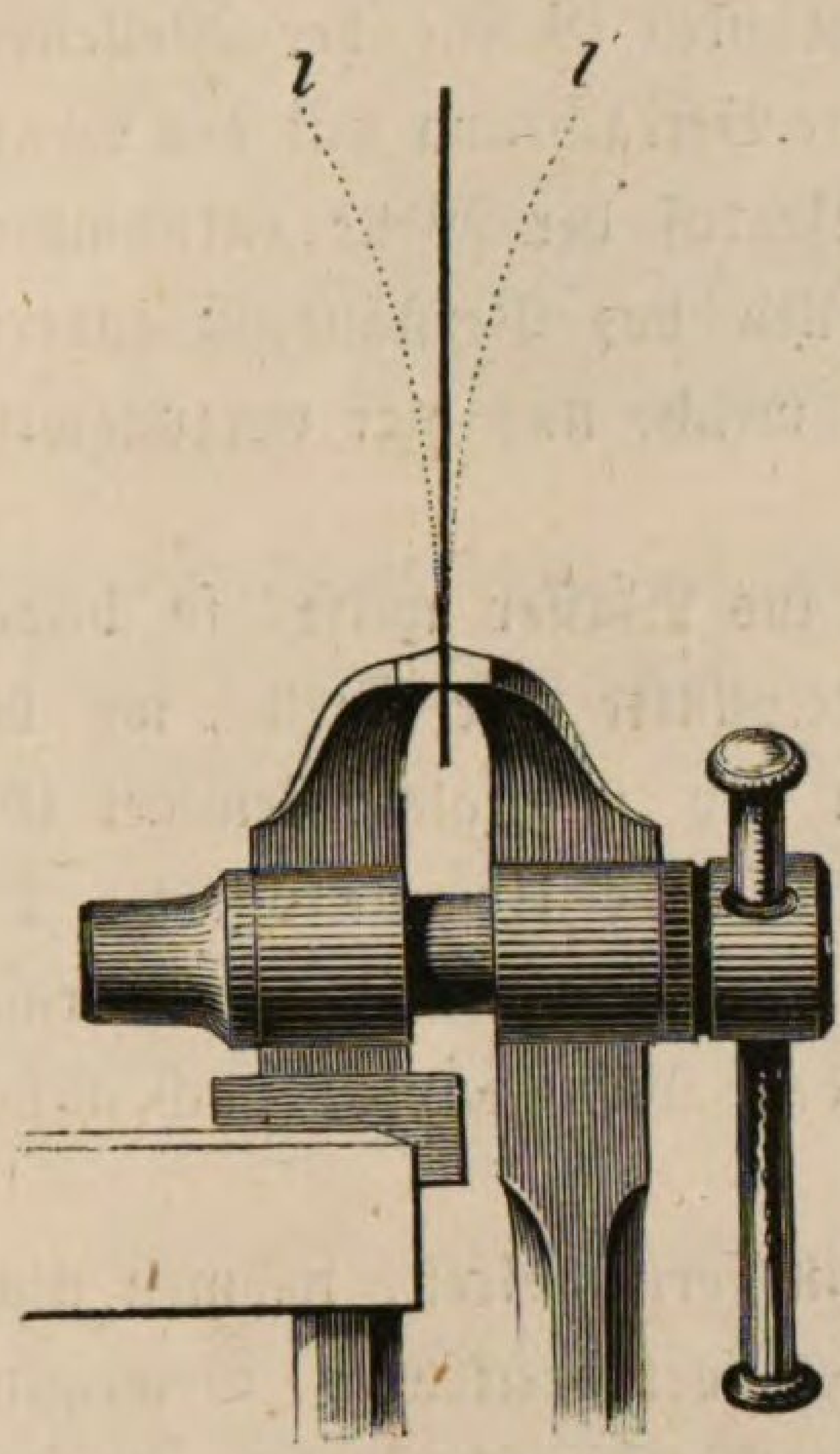
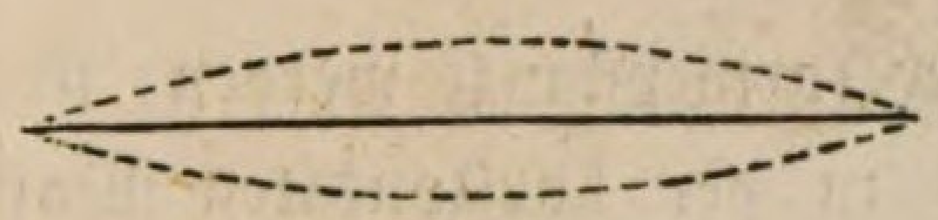


Fig. 188.



Wenn die Bewegungen der einzelnen Theilchen von der Art sind, daß die Vibrationsbewegung von Theilchen zu Theilchen fortschreitet, daß jedes folgende Theilchen dieselben Oscillationen macht wie das vorhergehende, nur mit dem Unterschiede, daß es seine Bewegung später beginnt, so sind dies fortschreitende Schwingungen. Durch die fortschreitenden Schwingungen werden Wellen erzeugt. Die Bewegung, das Fortschreiten der Welle ist hier wesentlich von der Oscillation der einzelnen Theilchen zu unterscheiden.

Beispiele von Wellenbewegung liefert uns eine ruhige Wasserfläche, auf welche man einen Stein fallen läßt, ein langes gespanntes Seil, gegen welches man nahe an einem Ende einen kräftigen Schlag führt, die Schallwellen in der Luft u. s. w. Wir werden diese verschiedenen Wellenbewegungen alsbald näher betrachten.

Die Vibrationsbewegungen können nun je nach der Ursache der Störung des Gleichgewichts, je nach der Natur der Kraft, welche die Theilchen wieder in die Gleichgewichtslage zurückzuführen strebt, bald größer, bald kleiner seyn, so daß dadurch die äußere Gestalt der Körper merkliche oder unmerkliche Formveränderungen erleidet; die Vibrationen können langsamer oder schneller seyn; sie sind oft langsam genug, daß man die einzelnen Schwingungen mit dem Auge verfolgen und zählen, oft sind sie aber auch so schnell, daß man die einzelnen Oscillationen nicht mehr für sich unterscheiden kann.

Wenn die Vibrationsbewegung eines Körpers einen gewissen Grad von Geschwindigkeit überschreitet, so kann ihre Gesammtwirkung noch einen Eindruck hervorbringen, indem sie in den umgebenden Medien Wellenbewegungen erzeugt, durch welche sie bis zu besonders eingerichteten Sinnes-Organen fortgeleitet wird und hier eine eigenthümliche Empfindung veranlaßt.

So veranlassen Vibrationen, deren Geschwindigkeit innerhalb gewisser bald näher zu besprechender Gränzen liegt, in der Luft oder anderen elastischen Medien Wellen, welche, in abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen bestehend, bis zum Ohre fortgepflanzt als Ton wahrgenommen werden.

Noch ungleich schnellere Vibrationen der Körpertheilchen bringen durch die

Wellenbewegung eines eigenthümlichen elastischen Fluidums, welches wir Aether nennen, bis in unser Auge fortgepflanzt, hier den Eindruck des Lichts hervor.

Da nun sowohl Schall- als Lichtvibrationen durch Wellenbewegungen fortgepflanzt werden, so wollen wir zunächst die wichtigsten Gesetze der Wellenbewegung überhaupt etwas näher betrachten und diese Betrachtung mit den Wasserwellen beginnen, weil von ihnen doch der Begriff der Welle entnommen ist und weil durch das Verständniß der Wasserwellen das Verständniß anderer Wellenbewegungen, namentlich der Schallwellen, welche uns hier vorzugsweise interessiren, sehr erleichtert wird.

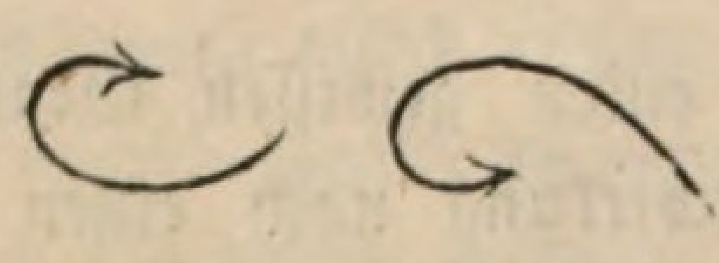
91 **Wasserwellen.** Wenn man einen Stein ins Wasser wirft, so bilden sich kreisförmige Wellen, welche von einem Mittelpunkte (der Stelle, wo der Stein ins Wasser fiel) aus nach allen Richtungen sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit verbreiten, wenn nicht irgend eine störende Ursache wirkt. Die Wellen bestehen in abwechselnden Bergen und Thälern, welche sich ziemlich rasch einander folgen und welche in der Richtung von dem Mittelpunkte nach außen hin fortschreiten.

Während nun ein Wellenberg nach außen hin fortschreitet, nehmen nicht etwa auch die einzelnen Wassertheilchen an dieser fortschreitenden Bewegung Antheil, denn wenn ein Stückchen Holz auf dem Wasser schwimmt, so sieht man, wie es abwechselnd gehoben wird und sich dann wieder senkt, wenn Wellenberge und Wellenthäler gleichsam unter ihm wegziehen.

Die Kraft, durch welche die Wasserwellen hier fortgepflanzt werden, ist die Schwere; denn wenn durch irgend eine Ursache in der horizontalen Wasserfläche eine Erhöhung oder Vertiefung hervorgebracht wird, so wirkt alsbald die Schwere der einzelnen Wassertheilchen, um die gestörte horizontale Ebene wieder herzustellen; dadurch wird eine Oscillationsbewegung hervorgebracht, welche nach und nach von Theilchen zu Theilchen fortgepflanzt wird.

Sobald sich einmal regelmäßige Wellen gebildet haben, beschreiben die einzelnen Wassertheilchen an der Oberfläche während des Fortschreitens der Welle in sich zurückkehrende Kurven, welche im Falle der größten Regelmäßigkeit Kreise sind, nur in solchen Fällen, in welchen der dem Gipfel vorangehende Theil des Wellenberges dem folgenden nicht gleich ist, beschreiben die einzelnen Wassertheilchen Kurven, die nicht in sich geschlossen sind, von der Art, wie sie Fig. 189 und Fig. 190 dargestellt sind.

Fig. 189. Fig. 190.

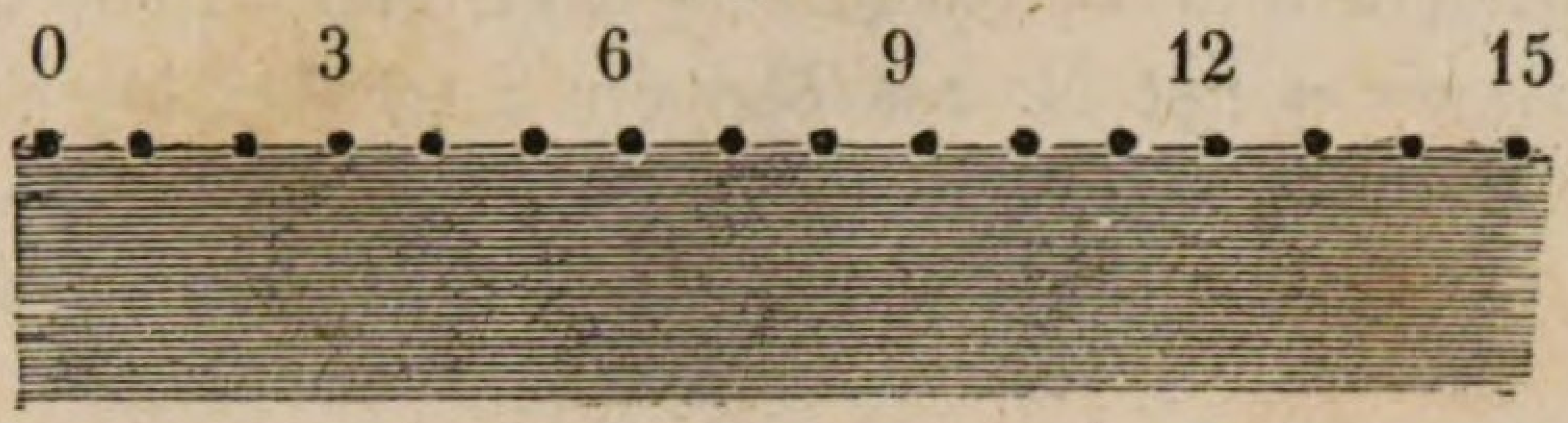


Betrachten wir nun den Zusammenhang zwischen der Bewegung der einzelnen Wassertheilchen und dem Fortschreiten der Welle etwas genauer.

Nehmen wir an, eine ganz regelmäßige Wellenbewegung habe sich, von der Linken zur Rechten fortschreitend, bis zu dem Wassertheilchen 0, Fig. 191, fortgepflanzt und veranlasse nun dieses Theilchen eine kreisförmige Bahn zurückzulegen. Während nun das Theilchen 0 zum ersten Male seine Kreisbahn vollendet, wird die Bewegung eine bestimmte Strecke sich fortpflanzen. Das mit

12 bezeichnete Wassertheilchen sey nun dasjenige, bis zu welchem sich die Oscillation von 0 aus fortpflanzt, während 0 eine Umdrehung vollendet, so wird 12

Fig. 191.



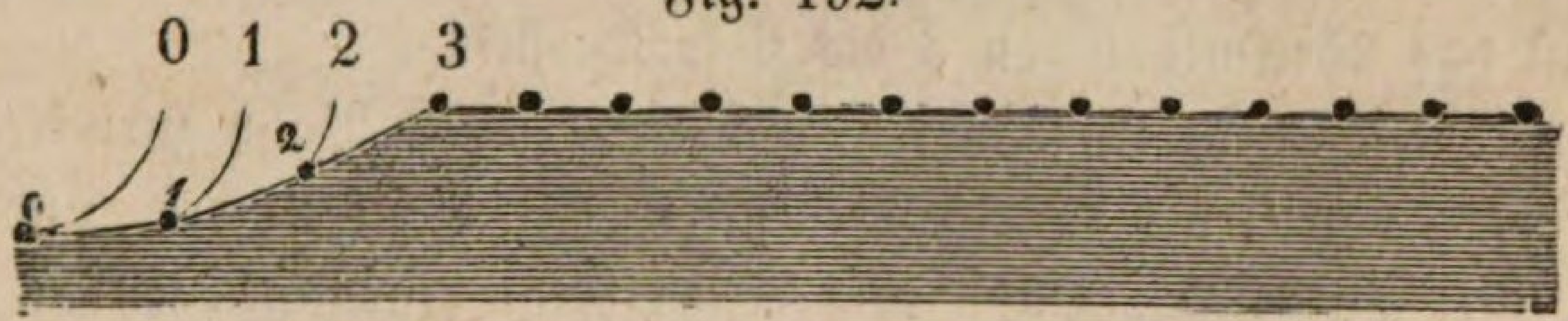
seine erste Umdrehung in demselben Momente beginnen, in welchem 0 seine zweite Umdrehung beginnt.

Denken wir uns nun den Umfang des Kreises, welchen das Theilchen 0 beschreibt, und ebenso den Raum zwischen 0 und 12 in 12 gleiche Theile getheilt, so wird die Wellenbewegung in der Richtung von 0 nach 12 immer um eine Abtheilung weiter schreiten, während das Theilchen 0 $^1/_{12}$ seiner kreisförmigen Bahn zurücklegt.

Während das Theilchen 0 das erste Zwölftel seiner Bahn zurücklegt, pflanzt sich die Wellenbewegung bis 1, während 0 das erste Viertel seiner Bahn zurücklegt, pflanzt sie sich bis 3 fort.

Fig. 192 stellt den Moment dar, in welchem das Theilchen 0 den vierten

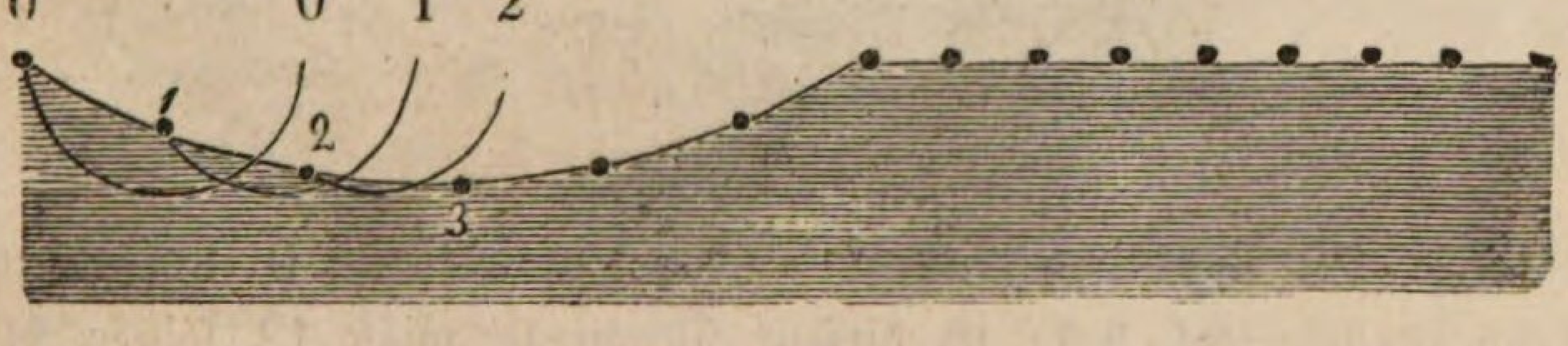
Fig. 192.



Theil oder $^3/_{12}$ des Kreises zurückgelegt hat, den es durchlaufen soll; das Theilchen 1 hat in diesem Augenblicke $^2/_{12}$, das Theilchen 2 hat $^1/_{12}$ seiner Kreisbahn zurückgelegt, das Theilchen 3 ist noch nicht aus seiner Gleichgewichtslage verrückt.

Die Fig. 193 bezieht sich auf den Augenblick, in welchem das Theilchen 0

Fig. 193.



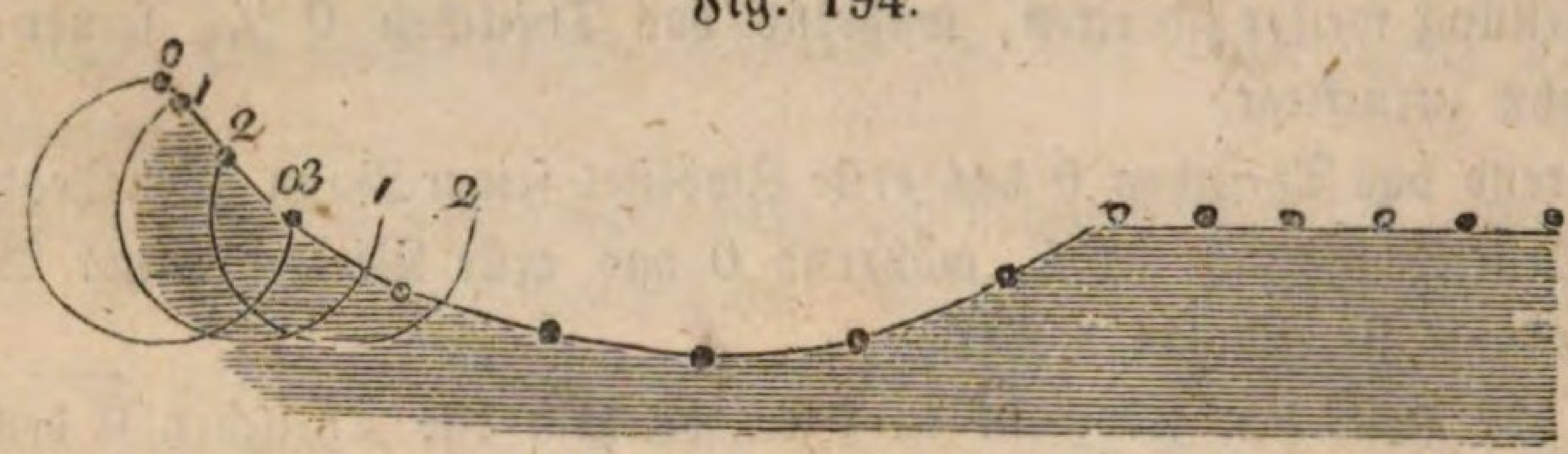
die Hälfte seiner Bahn zurückgelegt hat; das Theilchen 1 hat $^5/_{12}$, das Theilchen 2 hat $^4/_{12}$, das Theilchen 3 hat $^3/_{12}$ seiner Bahn zurückgelegt; die Theilchen 4 und 5 befinden sich in derselben Lage wie die Theilchen 1 und 2 der vorigen Figur. Das Theilchen 6 ist noch nicht aus seiner Gleichgewichtslage entfernt, beginnt aber eben seine Bewegung.

Hier hat das Theilchen 3 seine tiefste Stellung erreicht, hier ist also die Mitte eines Wellenthals.

Wenn nun abermals $1/12$ der Umlaufszeit eines Theilchens vergangen ist, so wird das Theilchen 3 in eine solche Lage gegen seine ursprüngliche Stellung gekommen seyn, wie es jetzt für das Theilchen 2 der Fall ist; das Theilchen 4 hat seine tiefste Stellung erreicht, es ist um $1/4$ Kreis von seiner Gleichgewichtslage entfernt; das Wellenthal ist also in diesem Zeittheilchen von 3 bis 4 fortgerückt.

Fig. 194 stellt den Moment dar, wo das Theilchen 0 $3/4$ seines Weges zurückgelegt, wo es den höchsten Punkt seiner Bahn erreicht hat, hier ist also jetzt der Gipfel eines Wellenberges. Das Theilchen 1 hat bereits $8/12$, 2 hat $7/12$, 3 hat $6/12$ seiner Bahn zurückgelegt; die Theilchen 4, 5, 6, 7, 8 befinden sich in derselben Lage wie 1, 2, 3, 4 und 5 der vorigen Figur. Von dem Momente

Fig. 194.

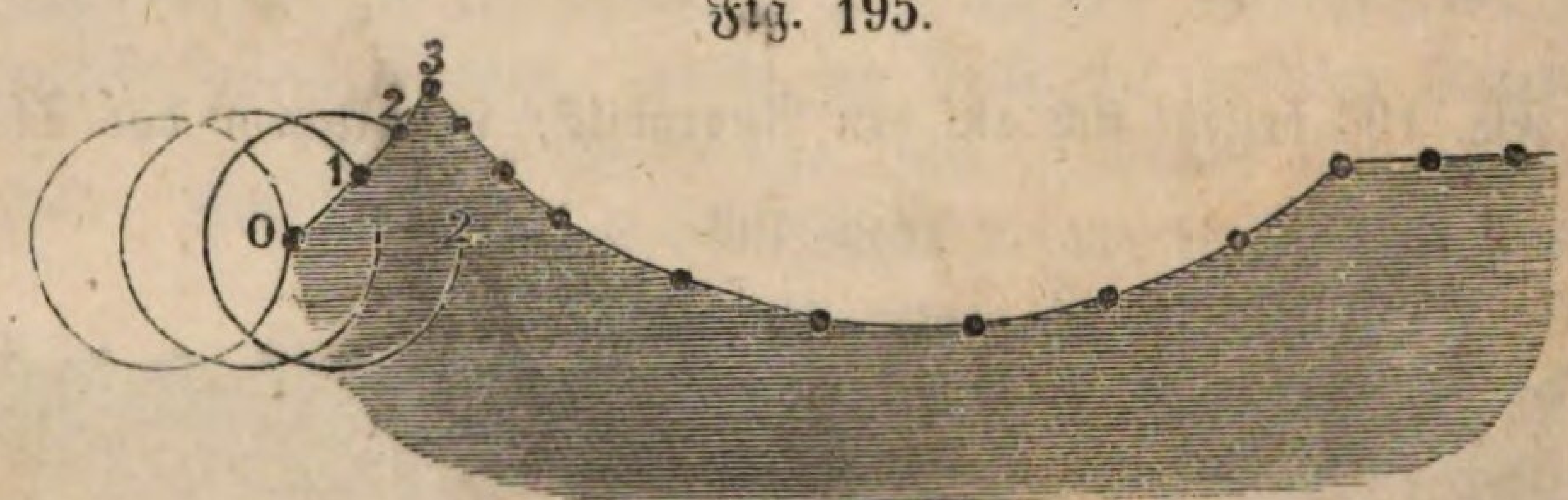


an, auf welchen sich Fig. 193 bezieht, bis zu dem Momente, welchen Fig. 194 darstellt, ist das Wellenthal von 3 bis 6 fortgerückt.

Während das Theilchen 0 das letzte Viertel seiner Bahn zurücklegt, schreitet der Wellenberg von 0 bis 3, das Wellenthal von 6 bis 9 fort, und in demselben Momente, wo 0 seine Bahn zum ersten Male zurückgelegt hat und seinen Weg zum zweiten Male beginnt, wird das Theilchen 12 zum ersten Male seine Bewegung antreten.

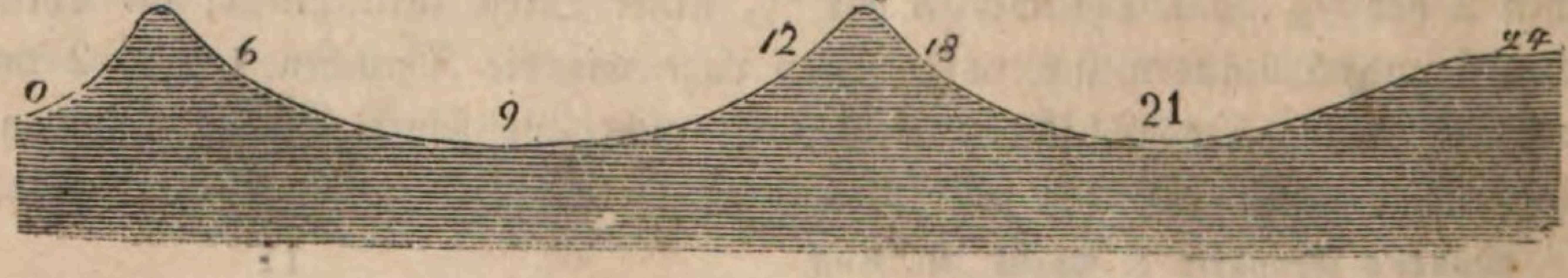
Dieser Moment ist in Fig. 195 dargestellt, welche wohl keiner Erläuterung mehr bedarf.

Fig. 195.



Die Fig. 196 stellt den Augenblick dar, in welchem 0 zum zweiten Mal seine Bahn zurückgelegt hat; in diesem Momente wird 12 seinen Weg zum

Fig. 196.



ersten Male gemacht und die Bewegung überhaupt sich bis 24 fortgepflanzt haben: ein Wellenberg ist in 3, ein zweiter in 15; ein Wellenthal ist in 9, ein zweites in 21.

Wenn nun die Wellenbewegung ungestört fortdauert, so werden dadurch, daß die einzelnen Wassertheilchen fortfahren, ihre Kreisbahnen zu durchlaufen, die Wellenberge sowohl als die Wellenthäler gleichmäßig in der Richtung von der Linken zur Rechten fortschreiten, indem ein Theilchen nach dem anderen den höchsten oder tiefsten Punkt seiner Bahn erreicht.

So schreitet denn Wellenberg und Wellenthal dadurch voran, daß allen Wassertheilchen dieselbe Kreisbewegung mitgetheilt wird, daß aber jedes folgende Theilchen dieselbe später beginnt als das vorangehende.

Die Entfernung von einem Theilchen bis zum nächsten, welches sich in gleichen Schwingungszuständen befindet, heißt eine Wellenlänge, also die Entfernung von 0 bis 12, von 12 bis 24, denn diese Theilchen beginnen gleichzeitig ihre Oscillation, sie erreichen gleichzeitig ihren tiefsten und ihren höchsten Stand. Demnach ist auch die Entfernung von dem Gipfel eines Wellenberges bis zum nächsten, also in unserer Figur von 3 bis 15, von der Mitte eines Wellenthales bis zur Mitte des nächsten Wellenthales, also hier von 9 bis 21, eine Wellenlänge.

Solche Theilchen, welche um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge von einander entfernt sind, wie 0 und 6, 3 und 9, 9 und 15, befinden sich stets in entgegengesetzten Schwingungszuständen. Das Theilchen 9 z. B. bildet eben den tiefsten Punkt eines Wellenthales, 3 und 15 dagegen den Gipfel eines Wellenberges. Die Theilchen 0 und 6 befinden sich zwar beide in der Höhe ihrer Gleichgewichtslage, allein die Bewegung von 0 ist nach unten, die von 6 ist nach oben gerichtet.

Während ein Theilchen eine Oscillation vollendet, schreitet die Welle um eine Wellenlänge voran.

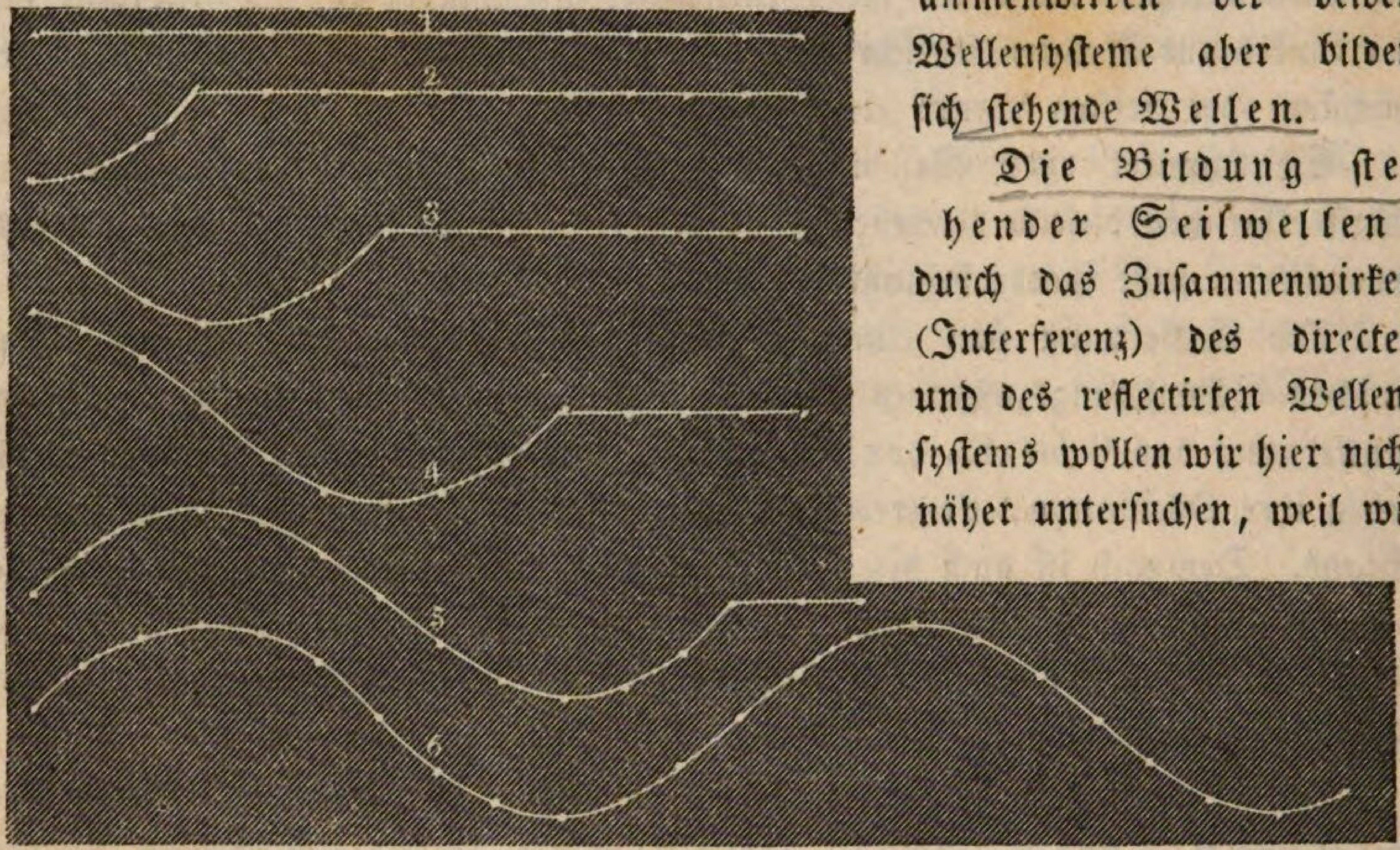
Seilwellen. Es ist schon bemerkt worden, daß die Bahnen der Wasser- 93
theilchen nicht immer, wie wir in unseren Zeichnungen annahmen, genau kreisförmig, ja nicht einmal immer in sich selbst zurückkehrende Kurven sind. Häufig geht die kreisförmige Bahn in eine elliptische über, indem bald der horizontale, bald der vertikale Durchmesser der größere ist. Wäre der horizontale Durchmesser gleich Null, so würden die einzelnen Theilchen nur rechtwinklig auf der Richtung, nach welcher sich die Wellen fortpflanzen, auf und nieder oscilliren. Eine Bewegung der Art ist es, welche die Wellen am gespannten Seile fortpflanzt. Später werden wir auch eine solche Wellenbewegung bei der Lehre vom Lichte näher kennen lernen.

Die Kurven 1 bis 6, Fig. 197 a. f. S., sollen dazu dienen, die Fortpflanzung solcher Wellen, also etwa der Seilwellen, anschaulich zu machen. Diese Kurven entsprechen ganz genau den Figuren 192 bis 196, sie lassen sich aus diesen ableiten, wenn man den horizontalen Theil der Bewegung gleich Null setzt, sie werden deshalb auch ohne weitere Erklärung verständlich seyn.

Wenn eine Seilwelle, gegen den einen Befestigungspunkt fortschreitend, an

demselben angekommen ist, so wird sie reflectirt, sie kehrt wieder nach dem anderen Ende zurück und läuft so mehrmals hin und her. Wenn aber nun fortwährend neue Wellen erzeugt werden, so wird es kommen, daß die reflectirten Wellen den neu ankommenden begegnen, durch das Zusammenwirken der beiden Wellensysteme aber bilden sich stehende Wellen.

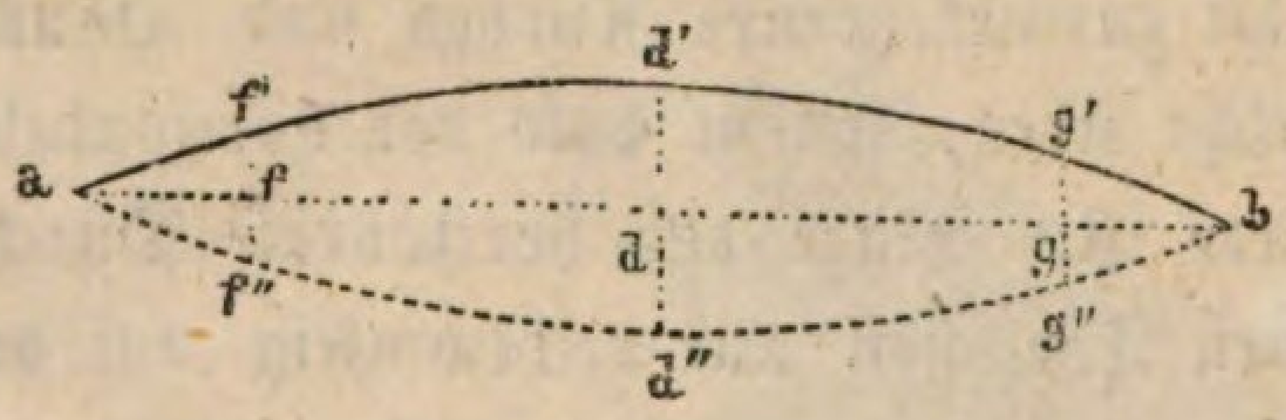
Fig. 197.



93 Die Bildung stehender Seilwellen durch das Zusammenwirken (Interferenz) des directen und des reflectirten Wellensystems wollen wir hier nicht näher untersuchen, weil wir später doch die auf ganz ähnlichen Principien beruhende Bildung stehender Luftwellen durch die Interferenz eines directen und eines reflectirten Wellensystems einer genauen Betrachtung unterwerfen müssen; wir wollen hier nur noch die Art der Bewegung eines Seiles oder einer Saite während solcher stehenden Schwingungen näher betrachten.

Der einfachste Fall ist der, daß das Seil seiner ganzen Länge nach schwingt, wie es in Fig. 198 dargestellt ist. Man kann diese Bewegung dadurch hervorbringen, daß man die Mitte eines nicht gar fest gespannten Seiles von 10 bis 20 Fuß Länge etwas aus ihrer Gleichgewichtslage (am besten etwas nach der Rechten oder nach der Linken) entfernt und dann das Seil sich selbst überläßt. Alle Theilchen befinden sich gleichzeitig auf der einen und dann wieder auf der anderen Seite der Gleichgewichtslage; sie erreichen gleichzeitig das Maximum ihrer Entfernung von der Gleichgewichtslage auf der rechten Seite und kommen gleichzeitig auf den Endpunkten ihrer Bahnen auf der anderen Seite an. Die Theilchen also, deren Gleichgewichtslage *f*, *d* und *g* ist, kommen gleichzeitig in *f'*, *d'* und *g'* an, sie passiren gleichzeitig ihre Gleichgewichtslage, nach derselben Richtung sich bewegend, sie kommen gleichzeitig in *f''*, *d''*, *g''* an.

Fig. 198.



Während also alle Theilchen sich gleichzeitig stets auch in gleichen Schwin-

gungszuständen befinden, ist nur die Amplitude ihrer Oscillationen ungleich, sie ist für das Theilchen *d* größer, als für *f* und *g*.

Die Schwingungen einer gespannten Saite, welche man aus ihrer Gleichgewichtslage bringt, oder die man in der Mitte ihrer Länge mit einem Fiedelbogen anstreicht, sind ganz von derselben Art. Die Schwingungen der Saite sind aber so schnell, daß man die einzelnen Oscillationen als solche nicht mehr unterscheiden kann, dahingegen bringen sie nun einen Ton hervor. In Beziehung auf diesen Ton werden wir später die Schwingungen der Saite noch einmal zu betrachten haben.

Die Schwingungen eines nicht gar zu stark gespannten Seiles sind langsam genug, um sie zählen zu können; es hält aber schwer, auf die angegebene Weise eine ganz regelmäßige Oscillationsbewegung hervorzubringen, wenn man die Mitte des Seiles in der Richtung von unten nach oben aus ihrer Gleichgewichtslage bringt, weil alsdann nicht allein die Elasticität des Seiles die Theilchen in ihre Gleichgewichtslage zurückführt, sondern auch die Schwere; wenn man aber die Mitte des Seiles nach der Rechten oder Linken aus der Gleichgewichtslage bringt, so ist die Bewegung theilweise eine förmliche Pendelbewegung, weil, wenn das Seil nicht sehr stark gespannt ist, die Mitte immer etwas herabhängt: spannt man es aber stärker, so werden die Schwingungen zu schnell, um sie einzeln unterscheiden zu können.

Am besten lassen sich die stehenden Schwingungen an einem Seile zeigen, wenn man das eine Ende desselben befestigt, das andere aber in der Hand hält und mit demselben in gleichförmiger Geschwindigkeit kleine Kreise beschreibt. Wenn man die richtige Geschwindigkeit für die Bewegung der Hand gefunden hat, was während des Versuches ganz leicht ist, so wird das Seil in eine solche Bewegung gerathen, daß die Mitte desselben einen großen Kreis um ihre Gleichgewichtslage beschreibt. Alle anderen Punkte des Seiles drehen sich dann gleichfalls in Kreisen um ihre Gleichgewichtslage; nur sind die Kreise um so kleiner, je näher die Punkte den Enden des Seiles liegen.

Wenn man nun die Bewegung der Hand beschleunigt, so wird die Regelmäßigkeit der Bewegung des Seiles gestört, es ist aber leicht, die Geschwindigkeit der Hand so zu beschleunigen, daß sich in der Mitte des Seiles ein Ruhepunkt bildet. Jede Hälfte des Seiles schwingt dann ganz in der Weise, wie in dem vorigen Falle das ganze Seil; die Mitte einer jeden Hälfte beschreibt

Fig. 199.

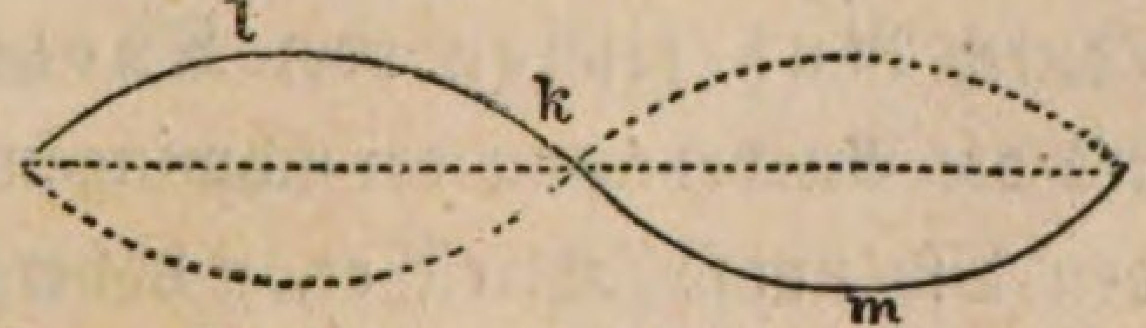
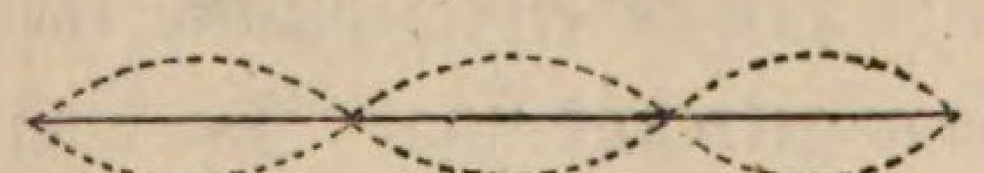


Fig. 200.



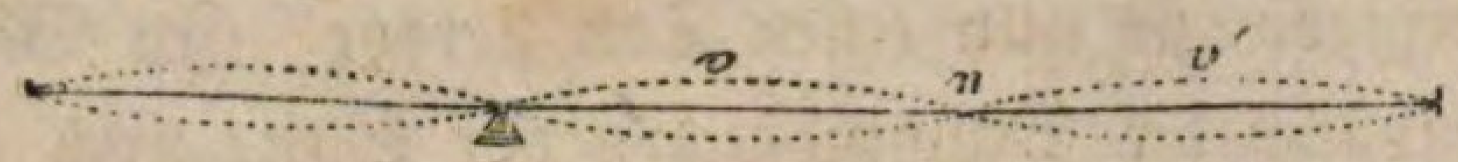
größere Kreise, als alle übrigen Punkte; hier bildet sich also ein **Bauch**. In Fig. 199 haben wir zwei Bäuche und einen **Knoten**; so nennt man nämlich den ruhenden Punkt *k*, welcher die beiden schwingenden Theile scheidet.

Wenn *l* seine höchste Stellung erreicht, so erreicht *m* gleichzeitig seine tiefste und umgekehrt.

Bei noch größerer Geschwindigkeit der Hand gelangt man leicht dahin, im Seile zwei Knoten und drei Bäuche zu erzeugen, wie dies in Fig. 200 dargestellt ist.

Ebenso ist es möglich, daß sich das Seil in noch mehr Abtheilungen theilt, die immer durch einen Knotenpunkt getrennt sind.

Fig. 201.

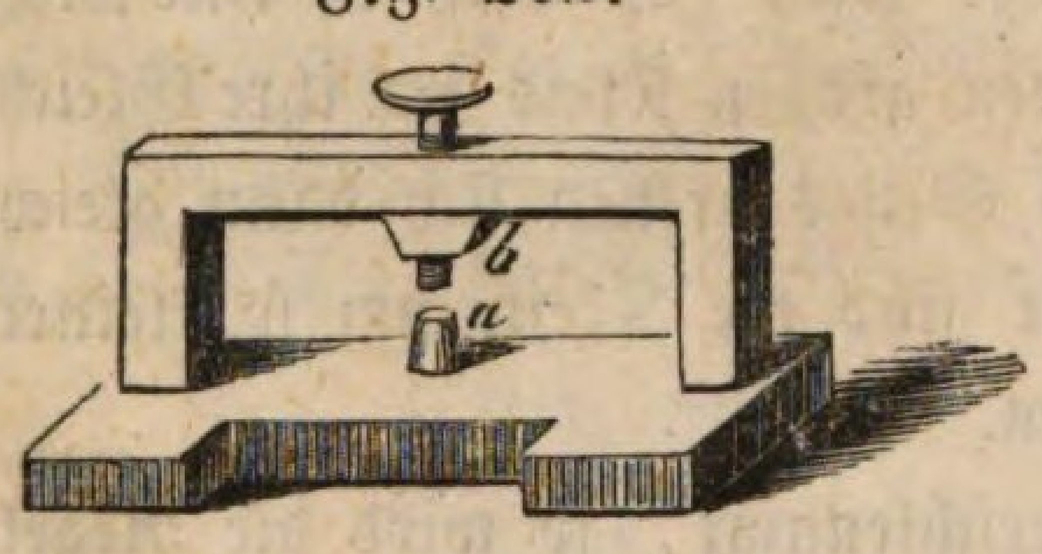


Auch an gespannten Saiten lassen sich die Knotenpunkte beobachten. Fig. 201 stelle eine gespannte Saite dar, an welcher durch einen Steg ein Stück abgeschnitten wird, dessen Länge ⅓ von der Länge der ganzen Saite beträgt, so also, daß durch den Steg die Saite in zwei Theile getheilt wird, von denen der eine halb so groß ist als der andere. Wenn man nun das kleinere Stück mit dem Fiedelbogen anstreicht, so geräth auch das andere Stück in Vibrationen, und zwar so, daß sich ein Knoten in *n* und zwei Bäuche in *v* und *v'* bilden. Der Knoten läßt sich dadurch nachweisen, daß man an verschiedenen Stellen der Saite leichte Papierreiterchen aufsetzt, welche überall sonst abgeworfen werden, während sie auf den Knotenpunkten sitzen bleiben.

Wenn man den Steg so setzt, daß durch ihn die Saite in zwei Theile getheilt wird, von denen der kleinere ¼ von der ganzen Länge der Saite ist, so bilden sich, wenn man diesen kleineren Theil mit dem Fiedelbogen anstreicht, im größeren zwei Knoten und drei Bäuche u. s. w.

In Platten, Glocken u. s. w. lassen sich ebenfalls stehende Schwingungen hervorbringen. Um Platten vibriren zu machen, kann man die Zange, Fig. 202, anwenden, welche aber selbst sehr gut befestigt seyn muß. Die Platte wird zwischen den Cylinder *a* und die Schraube *b* gebracht, welche beide mit einem Stückchen Kork oder Leder endigen. Wenn die Platte gehörig festgeschraubt ist, kann man die Vibrationen durch Anstreichen mit dem Fiedelbogen hervorbringen.

Fig. 202.



Man kann auf diese Weise Platten von Holz, Glas, Metall u. s. w. in Schwingungen versetzen, sie mögen nun dreieckig, viereckig, rund, elliptisch u. s. w. seyn. Die vibrirenden Platten erzeugen ebenso wie die vibrirenden Saiten Töne, welche bald höher, bald tiefer sind. Man beobachtet ferner, daß sich die Platte für jeden dieser Töne in mehrere für sich schwingende Flächenstücke theilt, welche durch Ruhelinien oder Knotenlinien getrennt sind. Im Allgemeinen wird die Ausdehnung der schwingenden Theile um so kleiner, die Knotenlinien werden also um so zahlreicher, je höher der Ton wird.

Um die Existenz dieser Knotenlinien nachzuweisen, streut man auf die obere Fläche der Tafel feinen trocknen Sand, welcher während des Tönens in die Höhe hüpft und niederfällt und sich endlich an den Knotenlinien anhäuft. Auf diese Weise entstehen die sogenannten Klangfiguren, deren Erfinder Chladni ist.

Mit derselben Platte lassen sich, wie schon bemerkt, eine Menge verschiedener Figuren erzeugen, je nachdem man mit dem Bogen stärker oder schwächer, schneller oder langsamer streicht, oder je nachdem man den Unterstützungspunkt der Platte verändert und an verschiedenen Stellen des Randes streicht.

Es sind in den Figuren 203 und 204 eine Reihe von Klangfiguren dargestellt, welche man mit einer quadratischen Platte erhält. Um z. B. das Kreuz zu erhalten, dessen Arme die Mittelpunkte je zweier paralleler Seiten des Quadrats verbinden (die erste Figur), hat man die Mitte einer Seite zu fixiren und an einem Eck zu streichen. Wenn man ein Eck fixirt und in der Mitte

Fig. 203.

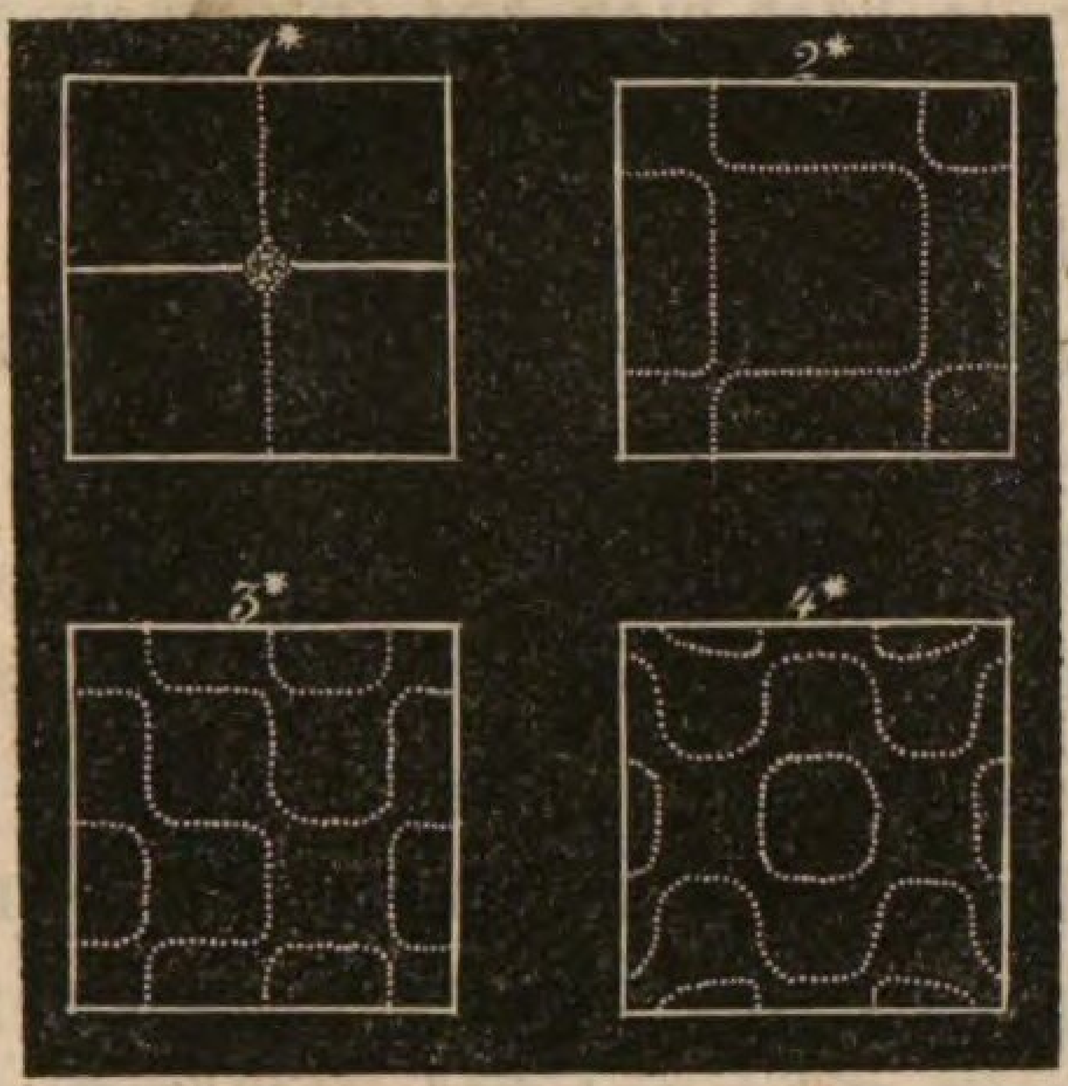
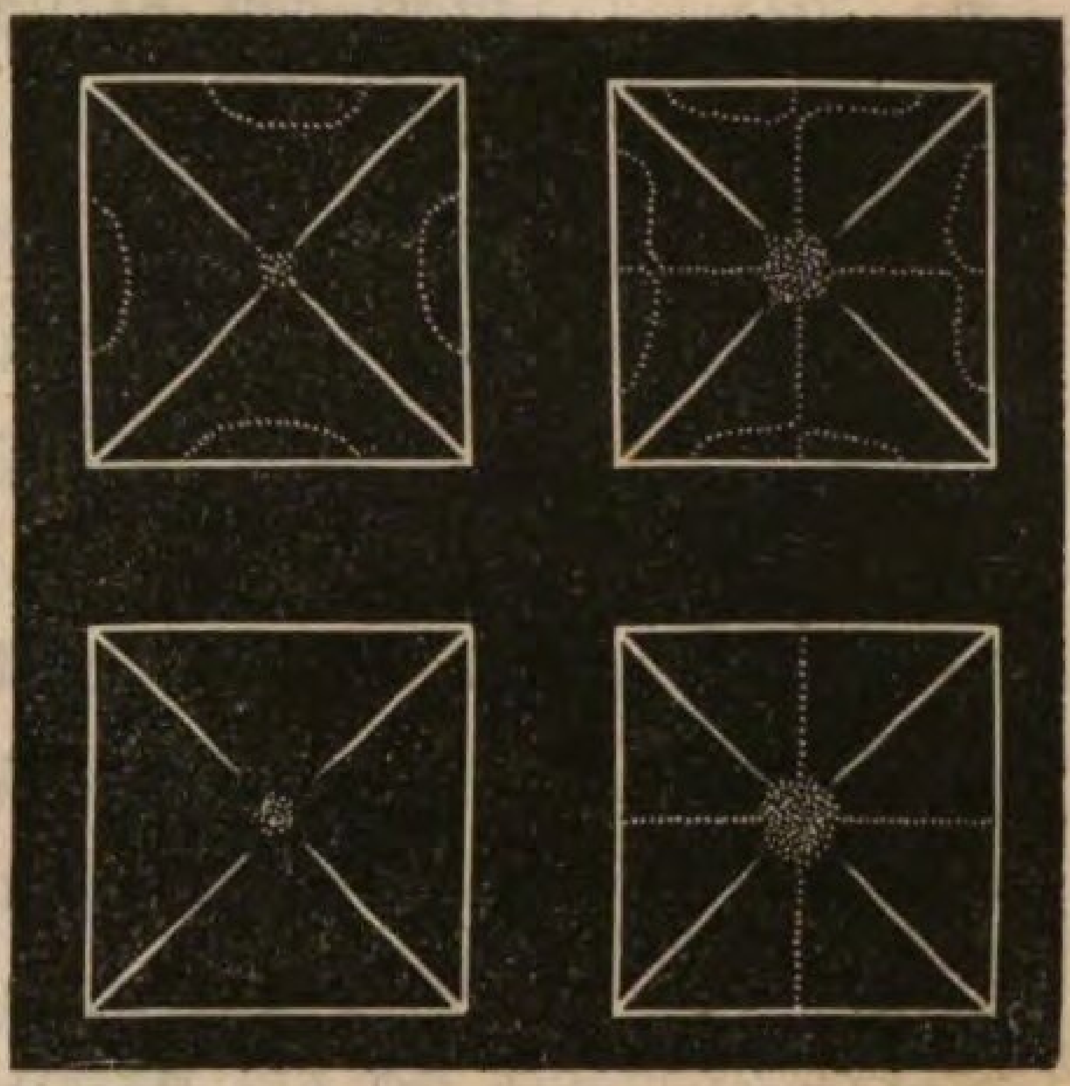


Fig. 204.



einer Seite des Quadrats streicht, so erhält man ein Kreuz, dessen Arme die gegenüberliegenden Ecken des Quadrats verbinden, Fig. 204.

Dreieckige und vieleckige Platten geben ähnliche Erscheinungen.

Fortpflanzung des Schalles in der Luft. Die Vibrationsbewegung irgend eines Körpers, welcher rings von Luft umgeben ist, erzeugt in 94
derselben eine Wellenbewegung, welche, bis zu unserm Ohr fortgepflanzt, die Empfindung des Schalles hervorbringt. In der Regel ist es freilich die Luft, in welcher sich die Schallwellen bis zu unserm Gehörorgane fortpflanzen, doch sind auch alle anderen elastischen Körper, feste sowohl wie flüssige, fähig, den Schall mehr oder weniger gut zu leiten, durch das Vacuum aber pflanzt sich der Schall nicht fort.

In die Mitte des Tellers der Luftpumpe lege man ein kleines Kissen von Wolle oder Kattun, auf welches man ein Uhrwerk setzt, durch welches fortwährend ein kleiner Hammer gegen ein Glöckchen angeschlagen wird. Nun wird eine Glocke aufgesetzt, wodurch der Klang der Glocke sogleich viel schwächer ertönt, aber immerhin noch deutlich hörbar bleibt; wird aber evacuirt, so verschwindet der Ton vollständig. Läßt man nun die Luft allmälig wieder eintreten, so unterscheidet man alsbald den Ton, welcher stärker und stärker wird, wenn sich die Glocke mehr und mehr mit Luft füllt. Der Schall kann sich also nicht durch den leeren Raum fortpflanzen.

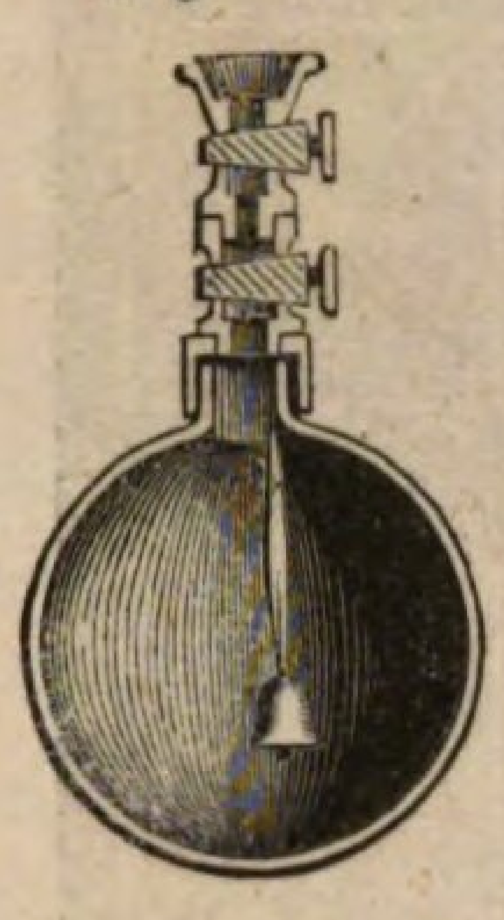
Der größte Lärm auf der Erde kann sich demnach nicht über die Gränzen unserer Atmosphäre verbreiten und von keinem anderen Himmelskörper kann auch nur

das mindeste Geräusch bis zu unserer Erde dringen; die furchtbarsten Explosionen könnten auf dem Monde stattfinden, ohne daß wir etwas davon hören.

Saussure sagt, daß auf dem Gipfel des Montblanc ein Pistolenschuß weniger Geräusch macht, als wenn man in der Ebene ein kleines Kanönchen losschießt, und Gay-Lussac fand, mit seinem Ballon in einer Höhe von 700 Metern, also in einer sehr verdünnten Luft schwebend, daß die Intensität seiner Stimme ungemein abgenommen hatte.

Nicht in der Luft allein, sondern in allen Gasen und Dämpfen kann sich der Schall verbreiten. Um sich davon zu überzeugen, hängt man in einem großen Ballon ein Glöckchen an ungedrehten Hanffäden auf (Fig. 205). Macht

Fig. 205.



man den Ballon luftleer, so hört man das Glöckchen nicht mehr; sobald man aber einige Tropfen einer flüchtigen Flüssigkeit, etwa Aether, in den Ballon bringt, bilden sich augenblicklich Dämpfe, und der Ton wird wieder hörbar.

Im Wasser pflanzt sich der Schall sehr gut fort, die Taucher hören was am Ufer gesprochen wird, und am Ufer hört man deutlich, wenn in großen Tiefen zwei Steine an einander geschlagen werden.

Die festen Körper endlich können den Schall nicht allein erzeugen, sondern auch fortpflanzen. Wenn man dem einen Ende eines 20 bis 25 Meter langen Balkens das Ohr nähert, so hört man deutlich, wenn am anderen Ende nur schwach angeklopft wird, wenngleich das Geräusch in der Luft so schwach ist, daß es selbst der kaum hört, welcher es hervorgebracht hat.

Um die Art und Weise, wie sich die Schallschwingungen in der Luft fortpflanzen, anschaulich zu machen, wollen wir uns denken, daß die Luft in einer an einem Ende offenen Röhre durch die Oscillationen eines am anderen Ende angebrachten Kolbens in Schwingungen versetzt wird.

In Fig. 206 ist eine solche Röhre dargestellt; die gleichweit von einander stehenden Striche stellen einzelne Schichten der überall gleich dichten Luft dar;

Fig. 206.

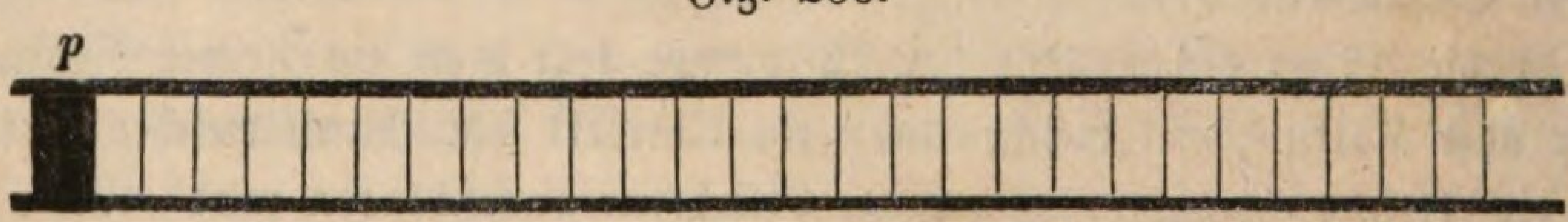
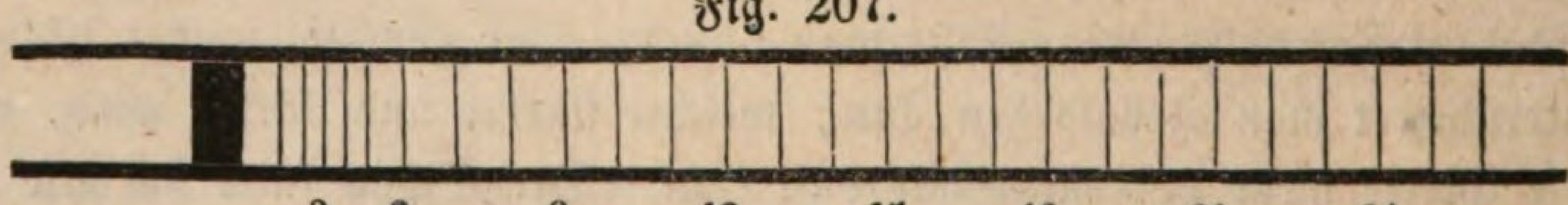


Fig. 207.



p ist der Kolben. Dieser Kolben soll nun aus der Stellung Fig. 206 in die Fig. 207, dann wieder zurück in seine ursprüngliche Lage und so fort rasch hin

und her gehen, so wird sich dieselbe Bewegung nach und nach auf alle folgenden Luftschichten fortpflanzen, so daß jede in derselben Weise hin und her oscillirt, nur werden die einzelnen Luftschichten diese Oscillationen um so später beginnen, je weiter sie vom Kolben entfernt sind.

Wenn der Kolben sich aus seiner ursprünglichen Lage nach der Rechten bewegt, so würde gleichzeitig die ganze Luftmasse aus der Röhre hinausgeschoben werden, wenn die Luft nicht elastisch wäre; weil aber die Luft elastisch ist, so pflanzt sich die Bewegung nicht momentan fort, und so entsteht an dem Kolben eine Verdichtung, wie dies Fig. 207 angedeutet ist, wo der Kolben seine äußerste Stellung rechts oben erreicht hat, während die Luftschicht 6 noch in ihrer ursprünglichen Lage ist, alle zwischen dem Kolben und 6 liegenden Luftschichten aber schon nach der Rechten verschoben sind.

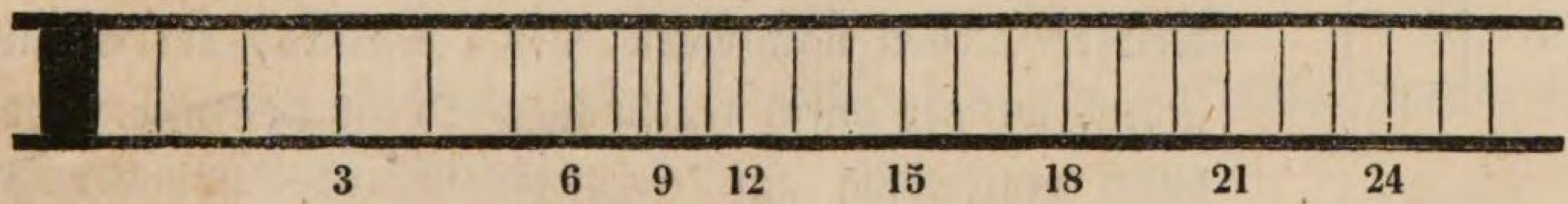
Weil die Luft zwischen dem Kolben und 6 comprimirt ist, so wirkt sie fortstoßend auf alle folgende Luftschichten, es werden der Reihe nach die Theilchen 6, 7, 8, 9 u. s. w. nach der Rechten fortgetrieben und so schreitet die Verdichtung in der Röhre von Schicht zu Schicht nach der rechten Seite hin fort.

In Fig. 207 sehen wir, wie das Maximum der Verdichtung zwischen dem Kolben und 6 in der Mitte bei 3 ist; während aber nun die Verdichtung nach der Rechten fortschreitet, geht der Kolben zurück, und diese rückgängige Bewegung pflanzt sich der Reihe nach auf die Schichten 1, 2, 3, 4 u. s. w. fort.

Während also, von der Stellung Fig. 206 ausgehend, das Dichtigkeitsmaximum nach der Rechten fortschreitet, indem der Reihe nach die Schichten 6, 7, 8, 9 u. s. w. nach der Rechten gehen, gehen die Theilchen 1, 2, 3 u. s. w. schon wieder nach der Linken, es muß also durch die rückgängige Bewegung des Kolbens eine Verdünnung entstehen, welche, der Verdichtungswelle folgend, gleichfalls nach der rechten Seite hin fortschreitet.

In Fig. 208 ist der Moment dargestellt, in welchem der Kolben zum ersten Male einen Hin- und Hergang vollendet hat; die Bewegung ist bis zur Luftschicht 12 fortgeschritten, bei 9 ist die größte Verdichtung, bei 3 die größte Verdünnung.

Fig. 208.



Durch jedes folgende Hin- und Hergehen des Kolbens wird abermals eine Verdichtungs- und Verdünnungswelle erzeugt, welche der ersten folgt u. s. w.

Jede vollständige Welle besteht aus einer Verdichtung und einer Verdünnung; die Verdichtung entspricht dem Wellenberg, die Verdünnung dem Wellenthal.

In Fig. 209 a. f. S. sind drei auf einander folgende Schallwellen dargestellt, die alle gleichförmig vom Kolben aus fortschreiten. An den verdichteten Stellen bewegen sich die Luftschichten in der Richtung vom Kolben weg, an der Verdünnungsstelle gegen den Kolben zu, wie dies Fig. 209 durch die Pfeile angedeutet ist.

Fig. 209.



Die Entfernung zwischen einem Verdichtungsmaximum und dem folgenden, oder zwischen einem Verdünnungsmaximum und dem folgenden ist eine Wellenlänge.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schallwellen ist von der Zeit unabhängig, während welcher jedes einzelne Theilchen eine Oscillation vollendet; da aber die Wellenlänge die Entfernung ist, um welche die Welle fortschreitet, während eine einzelne Luftschicht eine vollständige Oscillation vollendet, so ist klar, daß die Wellenlänge in demselben Verhältnisse zunimmt, in welchem die Oscillationsdauer der einzelnen Luftschichten wächst; wenn der Kolben und mithin auch die folgenden Luftschichten zu einer Oscillation, also zu einem Hin- und Hergange, die doppelte, dreifache, vierfache u. s. w. Zeit brauchen, so wird auch die Wellenlänge zwei-, drei-, viermal u. s. w. so groß geworden seyn.

Wir haben hier der Einfachheit wegen die Fortpflanzung der Luftwellen in einer Röhre betrachtet; ganz in derselben Weise pflanzen sich aber auch die Wellen in freier Luft von den oscillirenden Körpern nach allen Seiten hin fort; sowie sich um die Stelle des Wassers, an welcher der Stein hineingefallen ist, kreisförmige Wellen bilden, so bilden sich um den oscillirenden Körper kugelförmige Luftwellen.

Wir haben nun gesehen, auf welche Weise der Schall (Schall nennen wir alle Wirkungen auf unser Gehörorgan) entsteht und fortgepflanzt wird; die Eindrücke aber, welche unser Gehör empfindet, sind sehr verschiedener Art. Der Schall, welchen man wahrnimmt, wenn durch einen plötzlichen, nicht wiederkehrenden Stoß, etwa durch eine Explosion, eine starke Verdichtung der Luft hervorgebracht wird, welche dann auf die bekannte Weise fortschreitet, ohne daß weitere Wellen nachfolgen, heißt Knall, der Schall dagegen, welcher durch regelmäßige Oscillationen erzeugt und durch regelmäßig auf einander folgende einander gleiche Wellen fortgepflanzt wird, heißt Ton. Wenn die Wellenbewegung, welche den Schall zum Ohre fortpflanzt, mehr und mehr unregelmäßig wird, so geht der Ton in Geräusch über.

Die Töne selbst zeigen aber unter sich auch sehr große Verschiedenheiten, unter denen vor allen die Verschiedenheit zwischen hohen und tiefen Tönen zu merken ist. Der Ton ist um so höher, je kleiner die Oscillationsdauer des Körpers ist, welcher ihn erzeugt, je kürzer die Luftwellen sind, welche ihn fortpflanzen.

Die Intensität der Töne hängt nicht von der Oscillationsdauer und

der Wellenlänge, sondern von der Oscillationsamplitude ab; je größer die Oscillationsamplitude des tönenden Körpers ist, desto bedeutender ist der Grad der Verdichtung und der nachfolgenden Verdünnung der Luftwellen, welche den Ton fortpflanzen.

Der Klang, der Charakter der Töne ist weit schwieriger zu definiren als die Intensität; bei gleicher Tonhöhe ist der Charakter des Tones einer Violine sehr von dem einer Flöte verschieden; die Physiker sind auch selbst über die Ursache dieser Verschiedenheit nicht ganz einig, es ist aber sehr wahrscheinlich, daß der Klang von der Ordnung abhängt, in welcher sich die Geschwindigkeiten und die Veränderungen der Dichtigkeit in den verschiedenen zwischen den beiden Enden der Welle liegenden Luftschichten folgen, und daß in vielen Fällen die verdichteten und verdünnten Theile der Welle unsymmetrisch seyn können.

Geschwindigkeit des Schalles. Alle Töne, welches auch ihre 95
Höhe oder Tiefe, ihre Intensität und ihr Klang seyn mag, verbreiten sich in der Luft mit gleicher Geschwindigkeit, denn wenn verschiedene Beobachter in verschiedenen Entfernungen dasselbe Concert anhören, so hören sie genau denselben Takt, dieselbe Harmonie, was nicht möglich wäre, wenn die höheren Töne gegen die tieferen voraneilten oder zurückblieben.

Während das Licht sich mit einer für irdische Entfernungen kaum meßbaren Geschwindigkeit fortpflanzt, braucht der Schall eine namhafte Zeit, um sich nur auf einige Entfernung fortzupflanzen; dadurch erklären sich einige Erscheinungen, welche man oft zu beobachten Gelegenheit hat. Wenn man einen Steinklopfer aus einiger Entfernung beobachtet, so hört man den Schlag nicht in dem Momente, in welchem man den Hammer aufschlagen sieht, sondern erst, wenn er wieder gehoben wird, was den Eindruck macht, als ob der Schall nicht durch das Aufschlagen des Hammers, sondern durch das Abreißen von dem Steine hervorgebracht würde. Wenn man ein Regiment nach dem Takte der vorausgetragenen Trommeln marschiren sieht, so beobachtet man eine wellenartige Bewegung, welche sich von den Trommlern aus durch die ganze Reihe fortpflanzt, was sich dadurch erklärt, daß nicht Alle gleichzeitig auftreten und den neuen Schritt beginnen, weil die Hinteren den Taktschlag immer später vernehmen als die Vorderen.

Die Geschwindigkeit des Schalles läßt sich auf eine ganz einfache Weise ermitteln; man beobachtet nur, wie viel Zeit zwischen der Wahrnehmung des Blitzes und des Knalles einer in einer bekannten Entfernung vom Beobachter losgebrannten Kanone vergeht. Am besten läßt sich natürlich eine solche Beobachtung des Nachts machen. Die genauesten Versuche der Art wurden von mehreren Gelehrten im Jahre 1822 bei Paris ausgeführt. Die Entfernung zwischen der Kanone und den Beobachtern betrug 9549,6 Toisen (1 Toise = 6 paris. Fuß), zwischen der Beobachtung des Blitzes und des Knalles vergingen 54,6 Secunden, woraus folgt, daß sich der Schall in gewöhnlicher Luft in

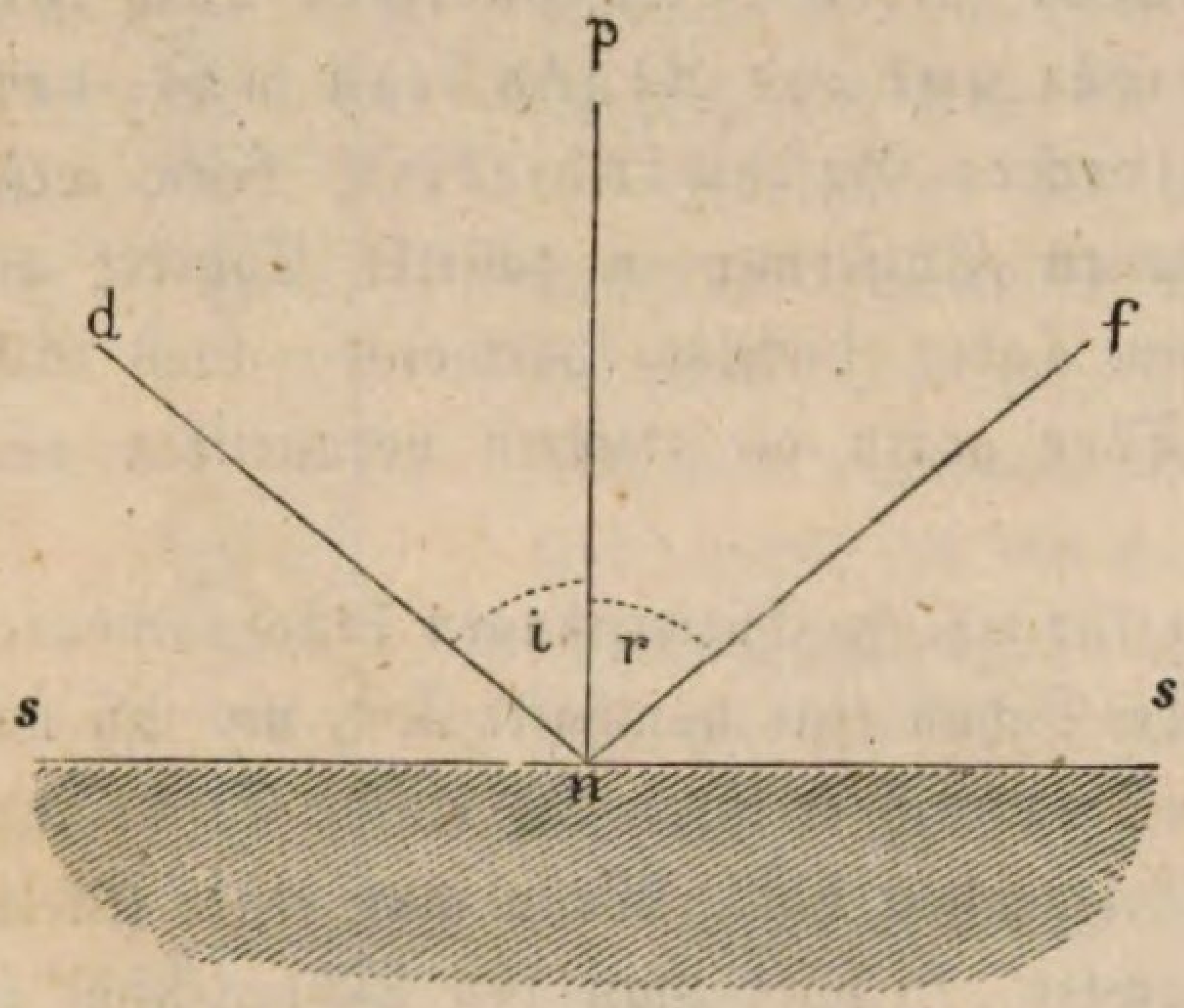
einer Secunde um 114,9 Toisen = 1049,4 (in runder Zahl 1050) Fuß = 340,88 Meter fortpflanzt.

In anderen Mitteln ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles nicht dieselbe; in Eisen pflanzt er sich $16^2/_3$'', in Wasser $4^1/_4$mal so schnell fort als in Luft.

96 **Von der Reflexion des Schalles und dem Echo.** Wenn die Schallwellen aus einem Mittel in ein anderes übergehen, so erleiden sie immer eine theilweise Reflexion; wenn sie aber auf ein festes Hinderniß stoßen, so werden sie fast vollständig reflectirt.

Mag nun die Reflexion partiell oder vollständig seyn, so ist doch der Reflexionswinkel stets dem Einfallswinkel gleich. Es sey *ss'*, Fig. 210, die Trennungsfläche der beiden Mittel, etwa Luft und Wasser, und eine Schallwelle bewege sich in der Richtung *di* gegen die Wasserfläche, so wird ein Theil der Bewegung in das Wasser übergehen, ein anderer Theil aber wird sich in der Richtung *ir* fortpflanzen, welche mit dem Perpendikel *ip* einen ebenso großen Winkel macht, wie *di*, d. h. der Reflexionswinkel *rip* ist dem Einfallswinkel *dip* gleich. Dieselbe Erscheinung würde nach demselben Gesetze stattfinden, wenn *ss'* die Trennungsfläche zweier Gasschichten von verschiedener Dichtigkeit wäre, oder wenn *ss'* die Gränzfläche eines festen Körpers wäre; nur würde in dem letzten Falle der reflectirte Ton weit intensiver seyn. Ein Beobachter also, welcher sich in irgend einem Punkte der Linie *ir* befindet, würde den Ton gerade so hören, als ob er von *i* oder einem Punkte der Verlängerung der Linie *ri* ausginge.

Fig. 210.



Auf diesem allgemeinen Principe beruht die Erklärung des Echo's.

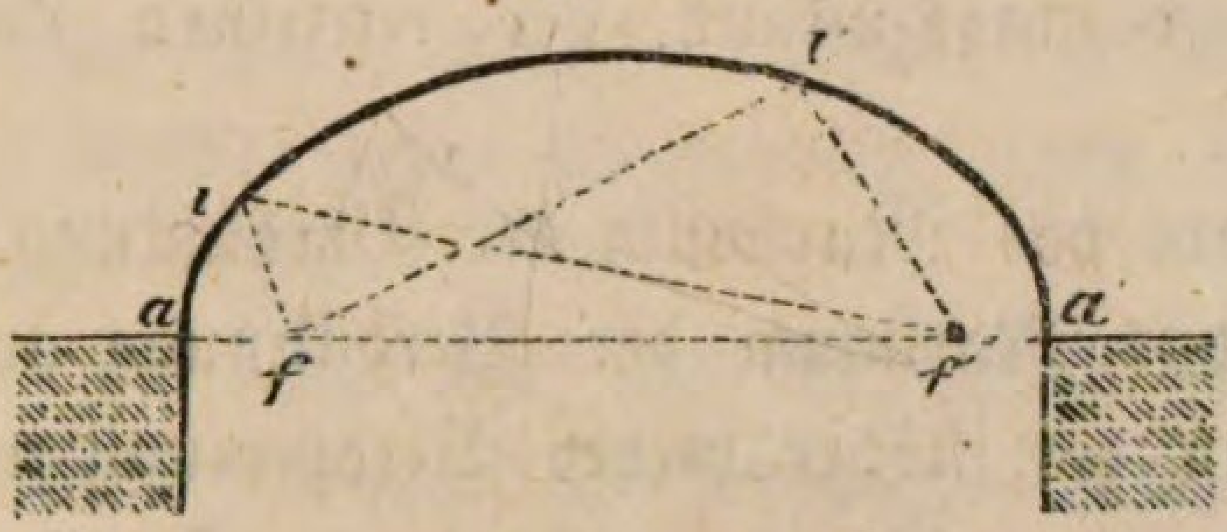
Wenn das Echo den Ton zu seinem Ausgangspunkte zurückschickt, so treffen die Schallwellen rechtwinklig auf die reflectirende Fläche. In diesem Falle kann ein Echo eine größere oder geringere Anzahl von Sylben unter Bedingungen wiederholen, welche leicht zu ermitteln sind. Wenn man schnell spricht, so kann man in 2 Secunden deutlich 8 Sylben aussprechen, in 2 Secunden durchläuft aber der Schall 2mal 340 Meter; wenn sich also in einer Entfernung von 340 Metern ein Echo befindet, so wird es alle Sylben in gehöriger Ordnung zurückschicken, und die erste wird nach 2 Secunden, d. h. dann zum Beobachter zurückkommen, wenn er eben die letzte ausgesprochen hat. In dieser Entfernung kann also ein Echo 7 bis 8 Sylben wiederholen; es giebt aber auch solche, welche 14 bis 15 Sylben zu wiederholen im Stande sind.

Es ist nicht durchaus nöthig, daß die reflectirende Fläche hart und platt sey, denn man beobachtet auf dem Meere oft, daß Wolken ein Echo bilden.

Die Erklärung der vielfachen Echo's, d. h. solcher, welche dieselbe Sylbe mehrmals wiederholen, beruht auf denselben Principien; denn da ein reflectirter Ton von Neuem reflectirt werden kann, so ist klar, daß zwei reflectirende Flächen einen Ton gegenseitig auf einander zurückwerfen können, wie zwei gegenüberstehende Spiegel sich das Licht zusenden. So kann ein vielfaches Echo zwischen zwei entfernten parallelen Mauern entstehen. Früher gab es nahe bei Verdun ein solches Echo, welches dasselbe Wort 12- bis 13mal wiederholte; es war durch zwei benachbarte Thürme gebildet.

Endlich giebt es Echo's, welche den Ton nach einer bestimmten Stelle hin tragen. Nehmen wir an, der Querschnitt eines Gewölbes sey eine Ellipse, Fig. 211, deren Brennpunkte in f und f' sind. Ein von f ausgehender Ton wird von allen Stellen des Gewölbes nach f' reflectirt, denn es ist eine Eigenschaft der Ellipse, daß, wenn man von f und f' Strahlen nach demselben Punkte der Kurve zieht, diese auch gleiche Winkel mit der Normale dieses Punktes machen. Wenn also eine Person in f, die andere in f' steht, so können sie sich gegenseitig verstehen, wenn sie auch ganz leise sprechen, wenn auch die Entfernung der beiden Punkte f und f' 50 bis 100 Fuß beträgt, während man in allen zwischenliegenden Punkten kein Wort hören kann.

Fig 211.



Durch die Reflexion des Schalles erklären sich auch die Wirkungen des Sprachrohrs und des Hörrohrs.

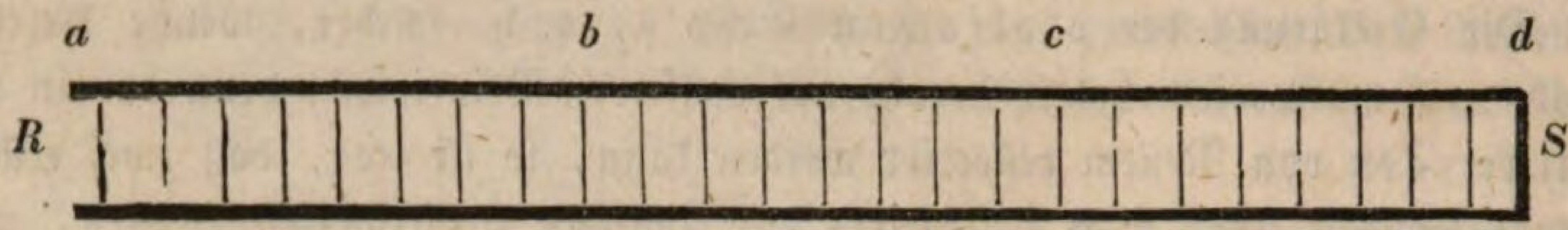
Zweites Kapitel.

Gesetze der Vibrationen musikalischer Töne.

Bildung stehender Luftwellen in gedeckten Pfeifen. Wenn 97
eine Schallwelle in das offene Ende einer auf der anderen Seite geschlossenen Röhre eintritt, so wird sie alsbald an den Boden der Röhre reflectirt, die reflectirten Wellen begegnen aber den neu eintretenden, und durch das Zusammenwirken beider Wellensysteme werden sich stehende Luftwellen bilden, wenn die Länge der Pfeife in einem geeigneten Verhältnisse zur Länge der Schallwelle steht.

Nehmen wir an, die Länge der Röhre *RS*, Fig. 212, sey ¼ von der

Fig. 212.



Länge der einfallenden Schallwellen, so ist der Weg von der Oeffnung zum Boden und dann wieder vom Boden bis zur Oeffnung gerade ½ Wellenlänge, die einfallende und die reflectirte Welle, welche sich an der Oeffnung der Röhre begegnen, stehen also in ihrem Gange um ½ Wellenlänge von einander ab; mit einem Dichtigkeitsmaximum der einfallenden Welle trifft also hier das Maximum der Verdünnung der reflectirten Welle zusammen, und umgekehrt; an der Oeffnung der Röhre findet also weder Verdichtung, noch Verdünnung Statt.

Betrachten wir aber nun den Bewegungszustand der einzelnen Luftschichten.

In dem Augenblick, in welchem gerade das Maximum der Verdichtung in die Oeffnung der Röhre eintritt, tritt das Maximum der Verdünnung aus; in diesem Moment findet auch am Boden der Röhre weder Verdünnung noch Verdichtung Statt, alle Theilchen sind in ihrer Gleichgewichtslage. Durch die eintretende Verdichtungswelle aber sind alle Theilchen gegen den Boden hingetrieben; durch die reflectirte Welle werden sie nach derselben Seite bewegt, da sich ja, wie Fig. 209 auf Seite 170 erläutert, die vibrirenden Luftschichten an den Stellen der größten Verdichtung in der Richtung bewegen, in welcher die Welle fortschreitet, an der Stelle der größten Verdünnung aber in einer Richtung, welche der Fortpflanzungsrichtung der Welle entgegengesetzt ist.

Alle Luftschichten in den Röhren bewegen sich also gleichzeitig aus der Gleichgewichtslage gegen den Boden hin, und ebenso, wenn das Maximum der Verdünnung eintritt, die Gleichgewichtslage passirend, gleichzeitig vom Boden weg.

Es ist dies durch die Fig. 213, 214 und 215 anschaulich gemacht.

Fig. 213.

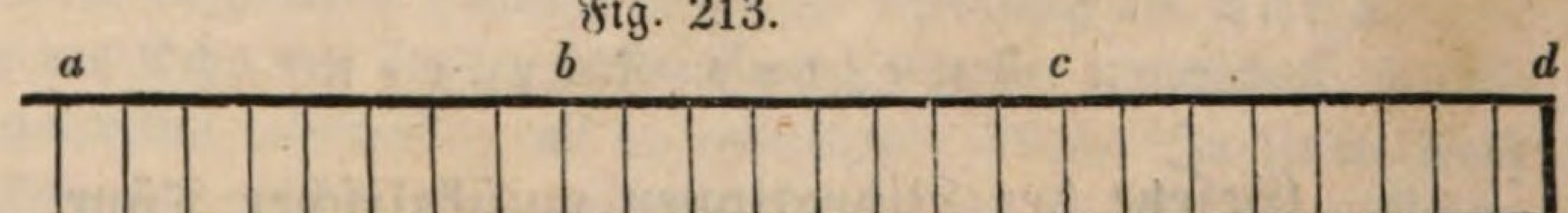


Fig. 214.

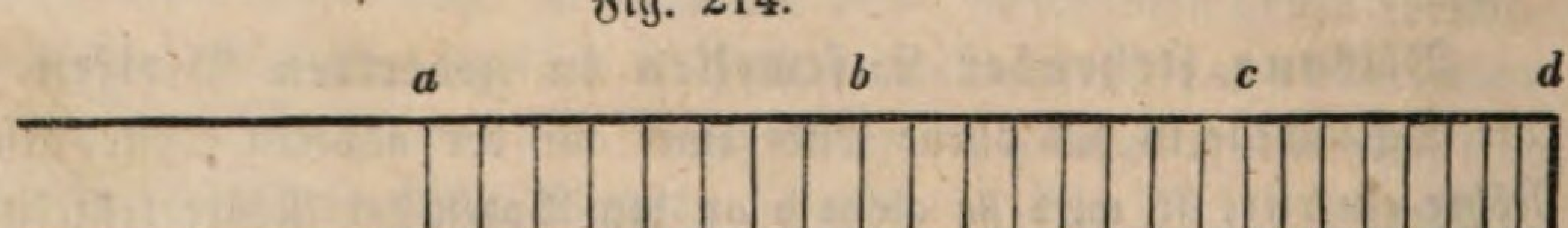
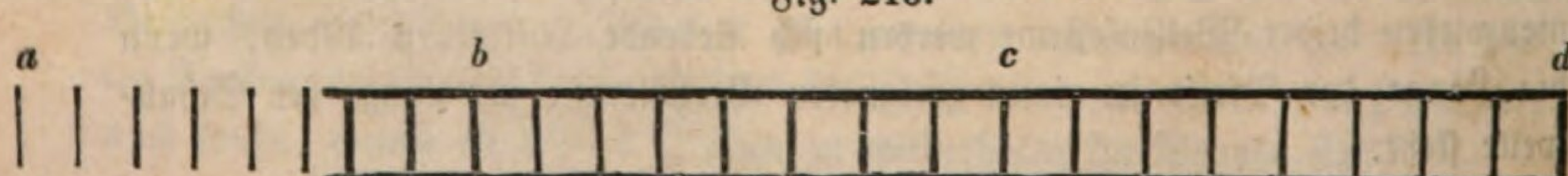


Fig. 215.



Wenn alle Luftschichten in der Röhre gleichzeitig gegen den Boden hin gehen, so muß hier eine Verdichtung entstehen, Fig. 214; wenn sie von der Gleichgewichtslage aus von dem Boden sich wegbegeben, so muß an demselben eine Verdünnung stattfinden.

Unsere Zeichnung ist, um den Hergang sichtbar zu machen, was die Oscillationsamplitude angeht, ungeheuer übertrieben, d. h. bei einer Pfeife von der Länge, wie sie in unserer Zeichnung dargestellt ist, würde in dem besprochenen Falle die Luftschicht, welche in ihrer Gleichgewichtslage an der Oeffnung der Röhre liegt, lange nicht so weit in die Röhre ein- und austreten, sie würde während ihrer Oscillation nur wenig nach der linken und rechten Seite schwanken. Wäre aber die Oscillationsamplitude nicht so groß genommen worden, so würden in der Zeichnung schwerlich die Unterschiede der Verdichtung und Verdünnung recht deutlich geworden seyn.

Es hat sich also hier durch die Interferenz der directen und reflectirten Wellen eine **stehende** Luftwelle gebildet, denn alle einzelnen Luftschichten in der Röhre gehen gleichzeitig gegen den Boden hin und gleichzeitig von demselben weg.

Die Fig. 216, 217, 218 sollen dazu dienen, die durch eine solche stehende Luftwelle abwechselnd hervorgebrachten Verdünnungen und Verdichtungen anschaulich zu machen. In Fig. 216 ist die ganze Röhre gleichförmig schattirt,

Fig. 216.

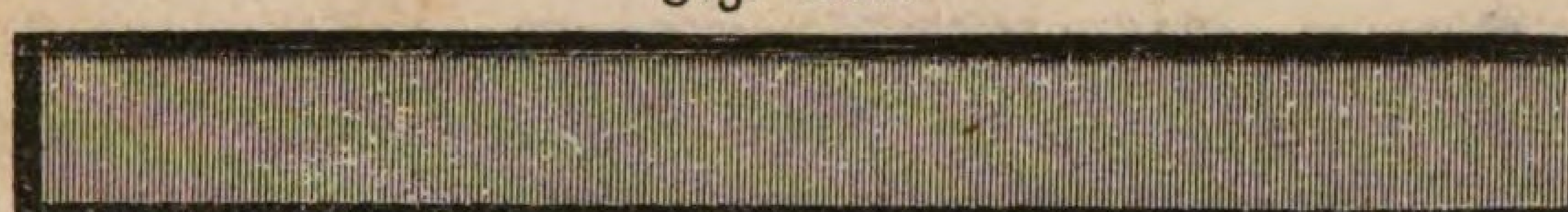


Fig. 217.

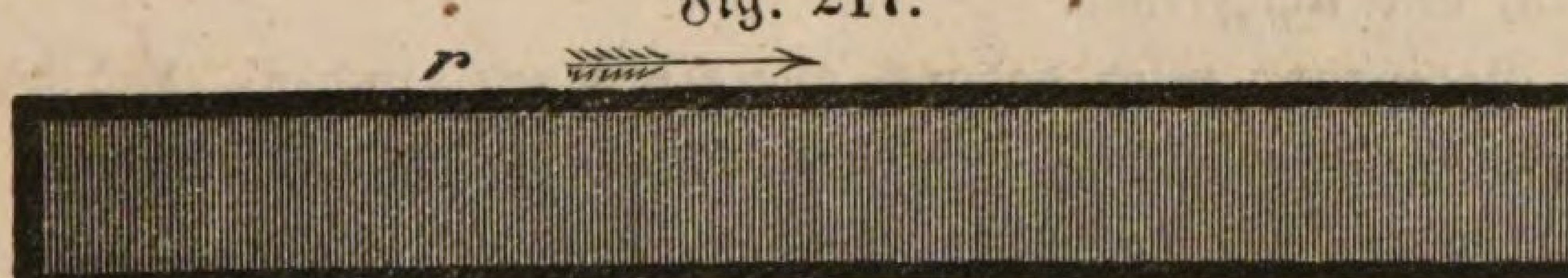
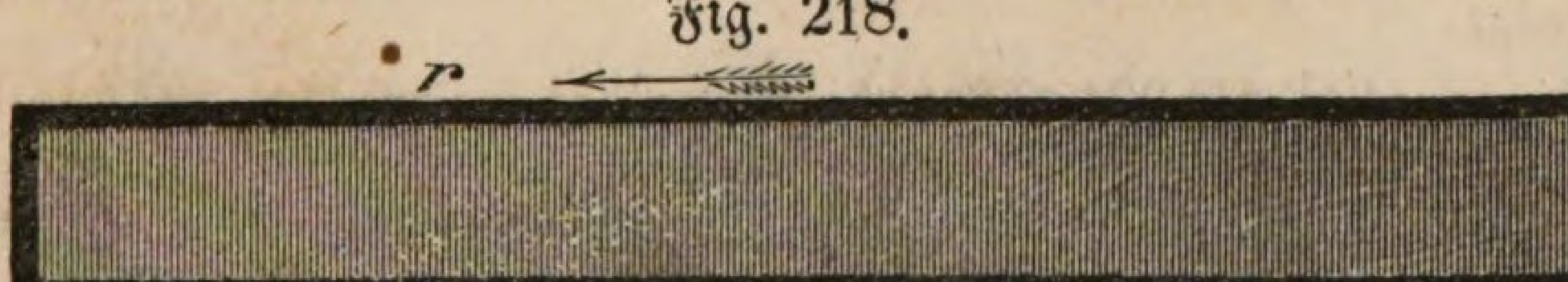


Fig. 218.



und dies entspricht dem Falle, daß die Luft in der ganzen Röhre eine gleichförmige Dichtigkeit hat, wie dies in den Momenten der Fall ist, wo alle die einzelnen Luftschichten mit dem Maximum ihrer Geschwindigkeit ihre Gleichgewichtslage passiren. Sind die Theilchen in ihrer Oscillation gegen das verschlossene Ende der Röhre hin an den äußersten Punkten ihrer Bahn angekommen, so findet hier eine Verdichtung Statt, Fig. 217.

Nun beginnen die einzelnen Luftschichten sich von dem verschlossenen Ende zu entfernen, und nach ½ Undulation haben wir hier eine Verdünnung, Fig. 218. Am offenen Ende der Röhre findet in keinem Zeitmomente eine merkliche Verdichtung oder Verdünnung Statt; hier aber bewegen sich die Luftschichten zwischen den weitesten Gränzen hin und her.

Die Pfeile in Fig. 217 und Fig. 218 deuten an, in welcher Richtung die Theilchen sich zu bewegen beginnen, wenn am Boden eben das Maximum der Verdichtung oder der Verdünnung stattfindet.

Würde nun in die Röhre, etwa bei *r*, ein Loch gemacht, so würde dadurch die Bildung der stehenden Welle gestört, wenn nicht ganz verhindert werden, weil im Momente der Verdichtung hier Luft entweichen, im Momente der Verdünnung aber Luft einströmen würde. Der störende Einfluß einer solchen Oeffnung würde aber an solchen Stellen, welche dem offenen Ende näher liegen, geringer seyn, weil hier die Verdünnung sowohl als die Verdichtung geringer ist.

Denselben störenden Einfluß, den eine Oeffnung hervorbringt, würde auch ein Abschneiden der Röhre an diesen Stellen zur Folge haben.

Die Bildung einer stehenden Luftwelle in der Röhre ist also an bestimmte Verhältnisse zwischen der Länge der Röhre und der Wellenlänge des einfallenden Tones gebunden; in dem bisher betrachteten Falle war die Länge der Röhre $\frac{1}{4}$ von der Wellenlänge des einfallenden Tones; es können sich aber auch noch bei anderen Verhältnissen zwischen Röhren- und Wellenlänge stehende Luftwellen in der Röhre bilden.

Zur Bildung der stehenden Welle in der Röhre ist erforderlich, daß dicht bei dem Boden die Oscillationsamplituden verschwindend klein werden, daß aber hier abwechselnde Verdünnungen und Verdichtungen stattfinden, während am offenen Ende der Röhre keine merkliche Verdichtung und Verdünnung stattfindet; an der Oeffnung der Röhre muß also stets der verdichtete Theil der reflectirten Welle mit dem verdünnten Theile der einfallenden Welle zusammenfallen, und umgekehrt.

Dieser Bedingung wird dadurch allerdings entsprochen, daß die Oeffnung der Röhre um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge von dem Boden entfernt ist, aber auch dadurch, daß die Entfernung der Oeffnung von dem Boden $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{4}$, $\frac{7}{4}$ u. s. w. Wellenlängen beträgt.

Die Figuren 219 bis 221 sollen die stehenden Luftwellen anschaulich machen,

Fig. 219.



Fig. 220.

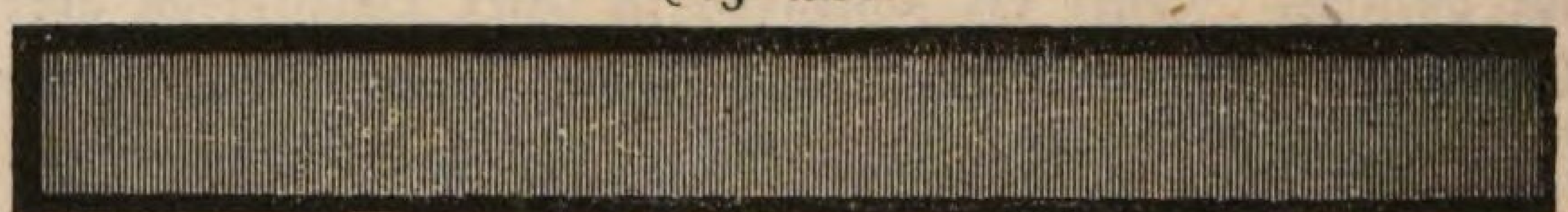
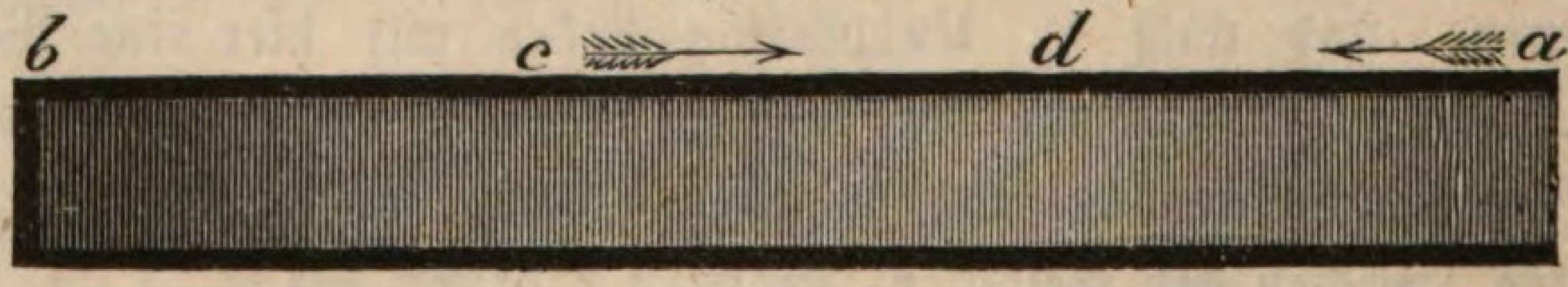


Fig. 221.



welche sich in einer Röhre bilden, deren Länge ¾ von der Länge der einfallenden Schallwellen beträgt.

In Fig. 219 sehen wir ein Maximum der Verdichtung in *d*, ein Maximum der Verdünnung am Boden der Röhre bei *b*; alle links von *d* liegenden Luftschichten beginnen gleichzeitig ihre Bewegung nach der durch den Pfeil angedeuteten Richtung, während die rechts von *d* gelegenen Luftschichten nach der Rechten hin sich zu bewegen beginnen.

Nach ¼ Undulation haben die einzelnen Schichten eine solche Stellung erreicht, daß in der ganzen Röhre die Luft eine gleichförmige Dichtigkeit hat, was durch Fig. 220 dargestellt seyn soll; in der angegebenen Richtung sich fortbewegend wird abermals nach ¼ Undulation der in Fig. 221 dargestellte Zustand eintreten; jetzt ist bei *b* die größte Verdichtung, bei *d* die größte Verdünnung.

Von diesem Momente an beginnen die einzelnen Luftschichten wieder sich gegen *d* hin zu bewegen, und so tritt dann nach ½ Undulation wieder der Zustand Fig. 219 ein.

Die Luftschichten, welche rechts und links von *d* liegen, bewegen sich entweder gleichzeitig von *d* weg, oder gleichzeitig nach *d* hin, während *d* keine Bewegung hat; die Luftschicht *d* bildet also einen Schwingungsknoten.

Die Stellen bei *c* und *a*, wo weder Verdünnung noch Verdichtung stattfindet, während hier die Luftschichten gerade mit der größten Amplitude schwingen, heißen Bäuche.

Um nun wirklich die Luft in einer geschlossenen Röhre in solche stehende Schwingungen zu versetzen, braucht man nur irgend einen oscillirenden Körper vor das Ende der Röhre zu bringen, welcher einen solchen Ton giebt, daß die Länge der Röhre ¼, ¾, 5/4 u. s. w. von der Wellenlänge dieses Tones ist.

Man kann zu diesem Zwecke eine gewöhnliche Stimmgabel anwenden, die man über ein unten verschlossenes Glasröhrchen von ungefähr 2 Zoll Länge hält, oder eine Glas- oder Metallplatte, die ganz in der Weise, wie zur Hervorbringung der Chladni'schen Figuren eingespannt ist und mit dem Fiedelbogen gestrichen und unter welche eine unten verschlossene Röhre gehalten wird. Wenn die Röhre die richtige Länge hat, so wird die in ihr eingeschlossene Luftmasse, in den Zustand stehender Schwingungen versetzt, selbsttönend, wodurch dann der Ton ungemein verstärkt wird, was namentlich dadurch deutlich wahrgenommen wird, daß man mit dem tönenden Körper über die Oeffnung der Röhre hin- und herfährt, so daß er bald sich über der Oeffnung befindet, bald nicht, wobei dann der Ton abwechselnd stärker und schwächer wird. — Sollte die Röhre für den tönenden Körper, welchen man anwendet, zu lang seyn, so kann man sie durch Eingießen von Wasser stimmen, d. h. man kann sie dadurch so weit verkürzen, daß sie für den tönenden Körper genau die richtige Länge hat.

Um die Luft in einer Röhre in stehende Schwingungen zu versetzen, um

sie also zum Selbsttönen zu bringen, ist nicht gerade nöthig, einen tönenden Körper vor die Oeffnung zu bringen, wie dies ja die Orgelpfeifen zeigen. Hier ist es ein am offenen Ende der Röhre vorbeiströmender, an ihren Rändern sich brechender Luftstrom, welcher durch seine Stöße Wellen erzeugt, die, an den Boden reflectirt, mit den neu einfallenden interferiren, so daß sich regelmäßige stehende Schwingungen bilden, durch welche die Luft in der Röhre selbsttönend wird.

Die Töne, welche eine Röhre auf diese Weise geben kann, sind dieselben wie diejenigen, welche ein anderer tönender Körper geben muß, wenn er, vor die Oeffnung der Röhre gebracht, die Luft in derselben zum Selbsttönen bringen soll.

Die einfachste Art, die Luft in einer kleineren Röhre zum Tönen zu bringen, ist die, daß man sie in vertikaler Richtung vor den Mund hält, das geschlossene Ende nach unten gekehrt, während das offene Ende an die untere Lippe gehalten wird, und dann schräg gegen den Rand der Röhre bläst.

Die Töne sind natürlich um so höher, je kürzer die Pfeife ist.

Die Orgelpfeifen haben gewöhnlich die in den folgenden Figuren abgebildete Einrichtung. Man unterscheidet an ihnen den Fuß, welcher den Wind giebt, den Mund und die Röhre, welche die Luftsäule enthält, deren Schwingungen den Ton geben. Der Fuß der Orgelpfeifen (Fig. 222 bis 226) ist hohl, und von dieser Höhlung gelangt der Wind durch eine feine Spalte in die Röhre. Der Mund bb' ist mehr oder weniger offen, d. h. die obere Lippe

Fig. 222.

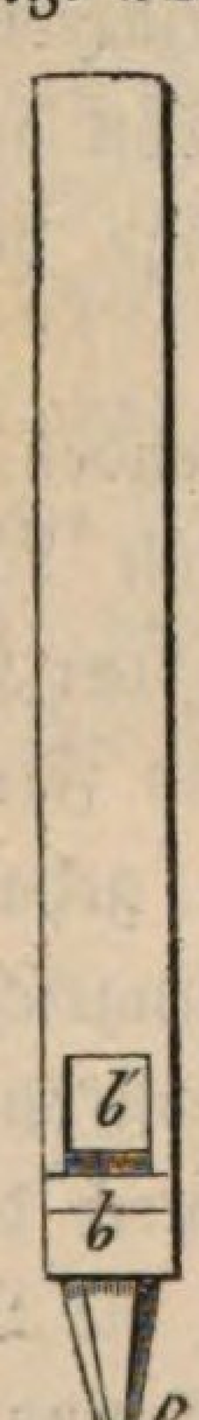


Fig. 223.

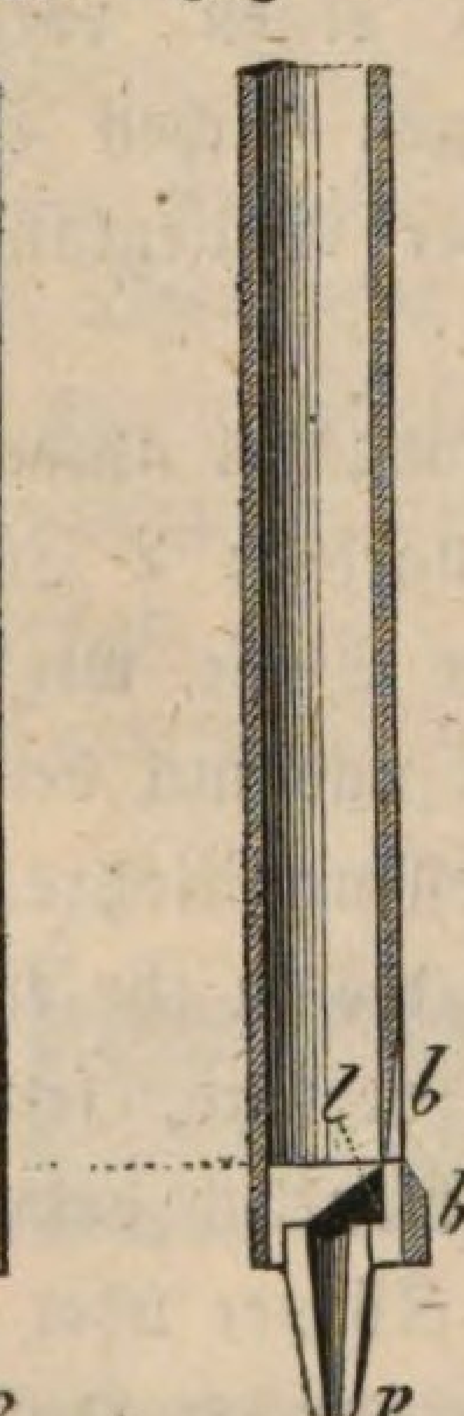


Fig. 224.

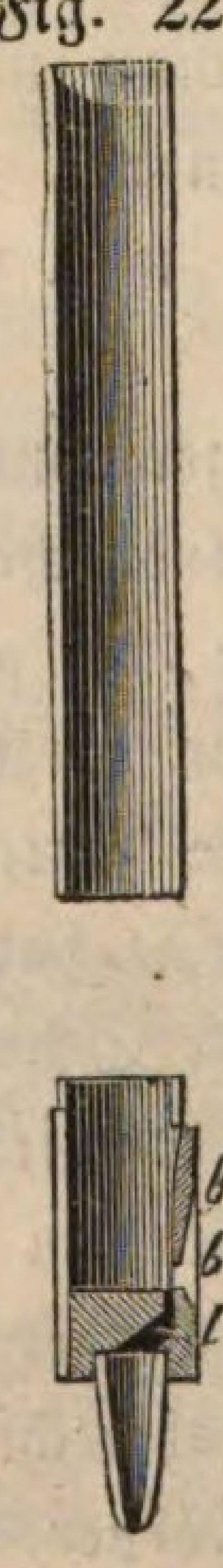


Fig. 225.



Fig. 226.



b' ist mehr oder weniger von der unteren entfernt. Manchmal ist diese obere Lippe verschiebbar, so daß man den Mund mehr schließen oder öffnen kann.

Der Wind wird in die Orgelpfeife durch einen Blasebalg eingeblasen.

Wenn die Luft in den Fuß der Röhre geblasen wird, so bildet sie bei dem Austreten aus dem Windloche eine dünne Schicht, welche sich gegen die obere Lippe bricht und dadurch gegen die Luft in der Röhre diejenigen Stöße ausübt, welche das Tönen veranlassen.

Eine und dieselbe an einem Ende geschlossene Röhre kann mehrere Töne geben. Der tiefste ist derjenige, dessen Wellenlänge 4mal so groß ist, als die Länge der Röhre; die höheren Töne, welche die Pfeife giebt, sind diejenigen, welche einer 3mal, 5mal u. s. w. kürzeren Wellenlänge entsprechen, welche also durch stehende Schwingungen erzeugt werden, welche eine 3mal, 5mal u. s. w. kleinere Oscillationsdauer haben als der tiefste Ton der Pfeife.

Den tiefsten Ton giebt die Pfeife bei schwächerem, die höheren bei stärkerem Winde.

Offene Pfeifen werden solche genannt, welche an beiden Seiten 98
offen sind. In der Mitte einer Röhre kann eine stärkere Verdichtung der Luft stattfinden als am Ende derselben, weil hier die Luft nicht nach der Seite hin ausweichen kann. Wenn nun der verdichtete Theil einer Welle am offenen Ende der Röhre ankommt, so werden beim Austritt aus der Röhre die Luftschichten leicht nach allen Seiten hin ausweichen und dadurch eine Verdünnung entstehen, welche nun, gleichsam von dem offenen Ende der Röhre reflectirt, dieselbe in entgegengesetzter Richtung durchläuft, und so bilden sich denn hier die stehenden Wellen.

Die rückkehrende Welle ist natürlich nicht so intensiv wie die ursprüngliche.

Da an dem offenen Ende der Röhre nun stets eine Verdichtung mit einer Verdünnung zusammenfällt, so muß hier nothwendig ein Bauch entstehen, Schwingungsknoten können sich nur im Inneren der Röhre bilden.

Wenn dem Tone des Körpers, durch welchen man die Luft in der Röhre zum Selbsttönen bringen will, eine Wellenlänge l zukommt, so ist die Länge der kürzesten offenen Röhre, welche durch diesen Ton angesprochen wird, $\frac{l}{2}$, d. h. die Röhre ist halb so lang als die Wellenlänge ihres Tones.

Wenn also die tiefsten Töne einer offenen und einer gedeckten Pfeife gleich seyn sollen, so muß die offene Pfeife doppelt so lang seyn, als die gedeckte.

Für den tiefsten Ton einer offenen Röhre befindet sich ein Schwingungsknoten in der Mitte ihrer Länge, ein Bauch aber an jedem Ende, wie dies Fig. 227 und Fig. 228 anschaulich gemacht ist. Fig. 227 stellt den Moment

Fig. 227.

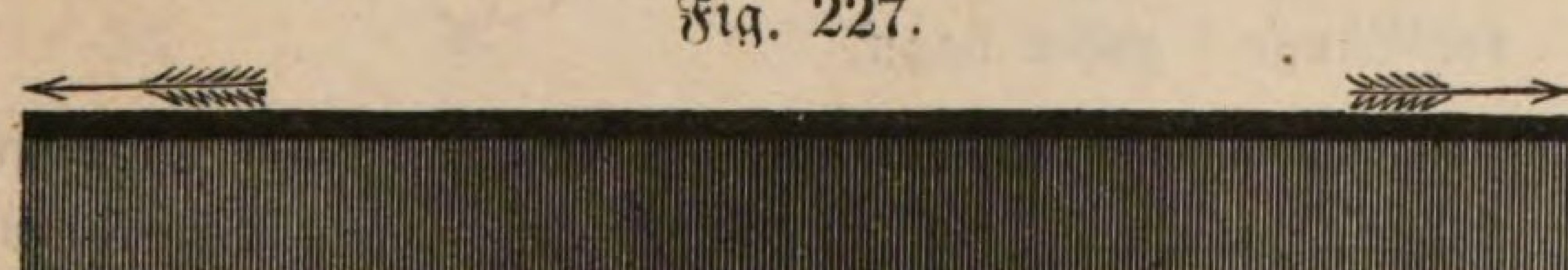
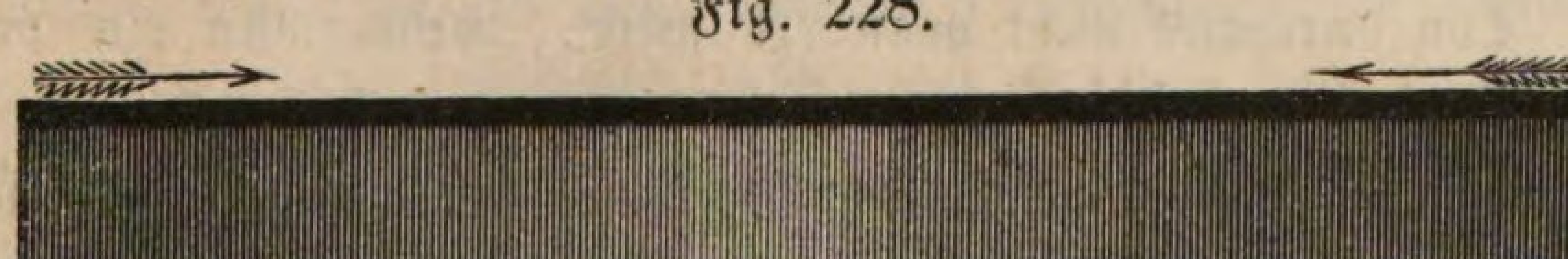


Fig. 228.



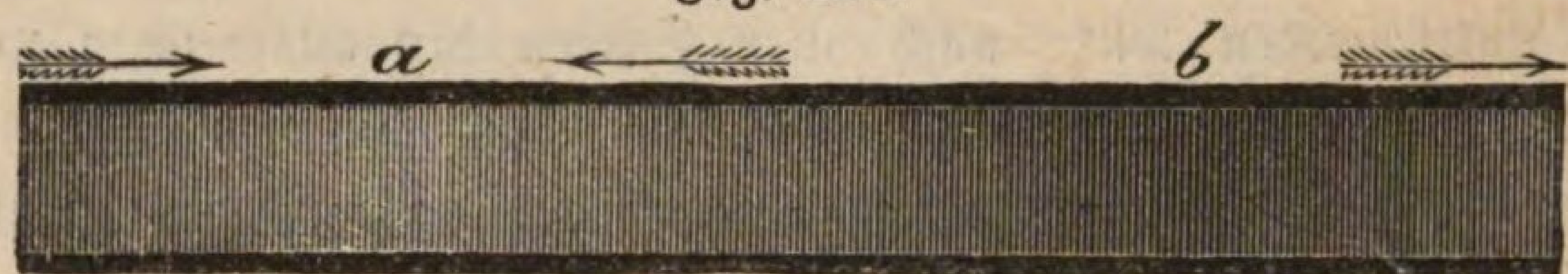
dar, wo in der Mitte der Röhre die größte Verdichtung stattfindet; während die Luftschicht in der Mitte der Röhre in Ruhe bleibt, beginnt die Luft auf beiden Seiten sich von der Mitte zu entfernen, wie dies durch die Pfeile angedeutet ist; nach einer halben Undulation findet in der Mitte der Röhre das Maximum der Verdünnung Statt, und nun beginnen die einzelnen Luftschichten von beiden Seiten her sich gegen die Mitte hin zu bewegen.

Der nächst höhere Ton der Röhre ist derjenige, für welchen sich ein Bauch in der Mitte der Röhre, Knoten aber in den Punkten *a* und *b* bilden, welche um $\frac{1}{4}$ der Röhrenlänge von den Enden abstehen. Wenn in *a* ein Maximum der Verdichtung stattfindet, wie Fig. 229, so findet in *b* eine Verdünnung Statt, und umgekehrt, Fig. 230.

Fig. 229.



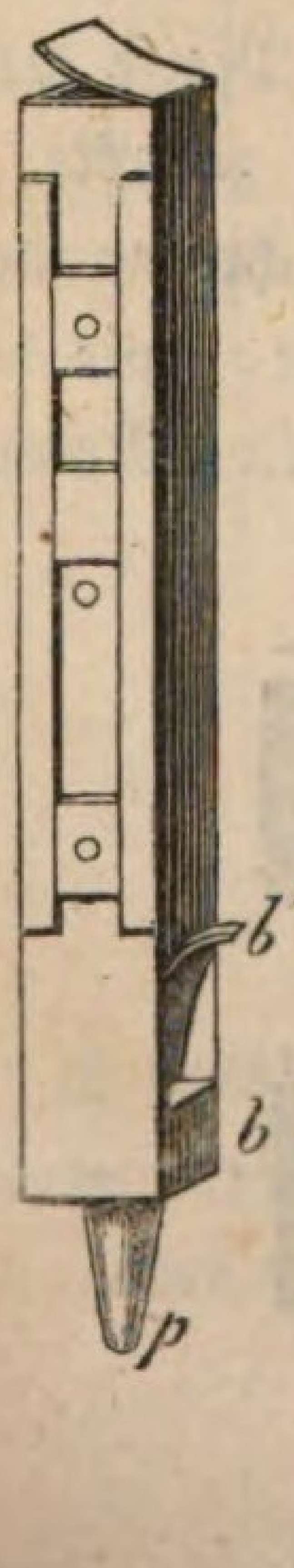
Fig. 230.



Für den eben besprochenen Fall ist die Wellenlänge des Tons der Länge der Röhre gleich; die Oscillationsdauer dieses Tons ist halb so groß als die des Grundtons der Röhre.

Der dritte Ton, welchen die Röhre geben kann, ist derjenige, dessen Wellenlänge $1\frac{1}{2}$mal in der Röhrenlänge enthalten ist; für diesen Ton bilden sich drei Schwingungsknoten, von denen einer in der Mitte liegt, während jeder der anderen um $\frac{1}{6}$ der Röhrenlänge oder $\frac{1}{4}$ der Länge der sich bildenden Schallwelle von einem Ende absteht.

Fig. 231.



Bezeichnen wir die Länge einer offenen Röhre mit l, so sind die Wellenlängen der Töne, welche sie geben kann,

$$2\,l,\ \frac{2}{2}\,l,\ \frac{2}{3}\,l \text{ u. s. w.},$$

während

$$4\,l,\ \frac{4}{3}\,l,\ \frac{4}{5}\,l \text{ u. s. w.}$$

die Wellenlängen der Töne sind, welche eine gedeckte Pfeife von der Länge l geben kann.

Wenn man an verschiedenen Stellen einer Orgelpfeife Löcher macht, die man nach Belieben durch einen Schieber verschließen oder öffnen kann, wie Fig. 231, so kann man zeigen, daß der Ton durchaus nicht geändert wird, wenn man ein Loch öffnet, welches sich an der Stelle eines Bauches befindet, was jedesmal der Fall ist, wenn ein Loch an einer anderen Stelle geöffnet wird.

Die musikalischen Töne. Nachdem wir nun ein Mittel kennen gelernt haben, reine Töne hervorzubringen, nämlich durch Orgelpfeifen, nachdem wir gesehen haben, wie die Höhe und Tiefe dieser Töne von der Länge der Pfeifen abhängt, daß man also durch Verlängerung und Verkürzung der Röhren die Pfeifen beliebig stimmen kann, wollen wir nun die Tonreihe näher betrachten, welche in der Musik zur Anwendung kommt. 99

Gehen wir von dem Tone aus, den eine 4 Fuß lange gedeckte Pfeife als Grundton giebt; es ist dies ein Ton, welcher in der Musik mit *C* bezeichnet wird.

Fragen wir nach denjenigen Tönen, die mit *C* zusammen einen angenehmen Eindruck auf das Ohr hervorbringen, so finden wir, daß es solche sind, deren Oscillationsgeschwindigkeit in einem einfachen Verhältnisse zu der von *C* steht; es sind dies diejenigen Töne, deren Wellenlänge $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{5}{6}$ von der des Tones *C* beträgt, die also durch solche Pfeifen hervorgebracht werden, deren Länge $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{5}{6}$ von der Länge der Pfeife *C* ist.

Da sich die Oscillationsdauer umgekehrt wie die Wellenlänge verhält, so macht also der erste der erwähnten Töne 2 Schwingungen, während *C* eine macht; dieser Ton heißt die Octav von *C* und er wird mit *c* bezeichnet.

Der Ton, dessen Wellenlänge $\frac{2}{3}$ von der des Tones *C* beträgt, macht 3 Oscillationen, während *C* deren 2 macht; dieser Ton ist die Quint von *C*, er wird mit *G* bezeichnet.

Der Ton, dessen Wellenlänge $\frac{3}{4}$ von der des Tones *C* ist, macht 4 Schwingungen, während *C* deren 3 macht, er wird die Quart von *C* genannt und mit *F* bezeichnet.

Der Ton, dessen Wellenlänge $\frac{4}{5}$ von der des Tones *C* ist, macht 5 Schwingungen, während *C* deren 4 macht, es ist die große Terz von *C* und wird mit *E* bezeichnet.

Der zuletzt erwähnte Ton, dessen Wellenlänge $\frac{5}{6}$mal so groß ist als die von *C*, macht 6 Schwingungen, während *C* deren 5 vollendet; es ist dies die kleine Terz von *C*, sie wird mit *Es* bezeichnet.

Ebenso wie *C* seine Octav, Quint, Quart, große und kleine Terz hat, so giebt es auch eine Octav, Quint, Quart, große und kleine Terz von *c*.

Der Grundton *C* mit seiner großen Terz *E* und seiner Quint *G* bilden den Cdur-Accord.

Nach den eben angegebenen Verhältnissen machen gleichzeitig

C	*E*	*F*	*G*	*c*
24	30	32	36	48

Schwingungen.

Um die Reihe der Töne gehörig zu vervollständigen, müssen nun aber *E*, *F* und *G* ebenso ihre Accorde, also ihr Terz und Quint haben wie *C*.

Die Quint von *G* ist ein Ton, welcher 3 Schwingungen macht, während *G* deren 2 vollendet: auf 36 Schwingungen von *G* gehen also 54 Schwingungen seiner Quint, die wir mit *d* bezeichnen wollen; die nächst tiefere Octav von *d* wird mit *D* bezeichnet, sie macht 27 Schwingungen, während *G* 36 und *C* 24 macht.

Die große Terz von *G*, die man mit *H* bezeichnet, muß 5 Schwingungen machen, während *G* 4 vollendet; auf 36 Oscillationen von *G* gehen also 45 Oscillationen von *H*.

Da sich 24 zu 36 (*C* zu *G*) verhält wie 32 zu 48 (*F* zu *c*), so ist *c* die Quint von *F*.

Die große Terz von *F* muß 5 Schwingungen machen, während *F* selbst deren 4 vollendet, auf 32 Oscillationen von *F* gehen also 40 Oscillationen seiner großen Terz, die mit *A* bezeichnet wird.

So haben wir denn eine Reihe von Tönen, welche den Namen der *Cour*-Tonleiter führt. Es machen gleichzeitig

C	*D*	*E*	*F*	*G*	*A*	*H*	*c*	*d*	*e*	u. s. w.
24	27	30	32	36	40	45	48	54	60	

Schwingungen.

Die Differenzen zwischen je zwei auf einander folgenden Tönen dieser Reihe sind nicht gleich. In der folgenden Reihe giebt der zwischen zwei Zahlen etwas tiefer gesetzte Bruch an, um den wievielsten Theil die Oscillationsgeschwindigkeit des nächstniedrigen Tones, die des folgenden, größer ist:

C		*D*		*E*		*F*		*G*		*A*		*H*		*c*;
	$\frac{1}{8}$		$\frac{1}{9}$		$\frac{1}{15}$		$\frac{1}{8}$		$\frac{1}{9}$		$\frac{1}{8}$		$\frac{1}{15}$	

in gleichen Zeiten macht also *D* $1\frac{1}{8}$mal so viel Schwingungen als *C*, *E* $1\frac{1}{9}$-mal so viel als *D*, *F* $1\frac{1}{15}$mal so viel als *E* u. s. w.

Das Intervall von *C* zu *D*, von *D* zu *E*, von *F* zu *G*, von *G* zu *A*, von *A* zu *H* heißt ein ganzer Ton. Man unterscheidet aber große ganze Töne, wenn das Intervall $\frac{1}{8}$, und kleine, wenn es $\frac{1}{9}$ beträgt.

Die Intervalle zwischen *E* und *F*, zwischen *H* und *c* sind nahe halb so groß wie die übrigen, sie werden deshalb halbe Töne genannt.

Wenn man, von irgend einem der anderen Töne ausgehend, in derselben Ordnung von Intervallen fortschreitet, so erhält man auf diese Weise die verschiedenen Durtonleitern; um aber ein Fortscheiten in derselben Ordnung von Intervallen von jedem Tone aus möglich zu machen, müssen noch zwischen *C* und *D*, *D* und *E*, *F* und *G*, *G* und *A*, *A* und *H* halbe Töne eingeschaltet werden, die mit *cis*, *dis*, *fis* u. s. w. bezeichnet werden.

Bei den Durtonarten geht man vom Grundtone zur großen Terz und dann, um eine kleine Terz fortschreitend, zur Quint über, bei den Molltonarten hingegen ist der Accord durch den Grundton, die kleine Terz und die Quint gebildet.

Eine nähere Besprechung der Tonarten und Tonleiter gehört mehr in die Theorie der Musik als hierher.

Wenn der Grundton 1 Schwingung in einer bestimmten Zeit macht, so muß die große Terz in derselben Zeit $\frac{5}{4}$, die große Terz dieses Tones $\frac{5}{4} \cdot \frac{5}{4}$ oder $\frac{25}{16}$ und die Terz dieses Tones endlich $\frac{5}{4} \cdot \frac{5}{4} \cdot \frac{5}{4}$ oder $\frac{125}{64}$ Schwingungen machen. Der letztere Ton stimmt nun nicht genau mit der Octav des Grundtons überein, welcher $\frac{128}{64}$ entsprechen; wenn man also in reinen Terzen

fortschreitet, so kommt man nicht zur reinen Octav, und will man die Reinheit der Octaven erhalten, so muß man von der vollkommenen Reinheit der Terzen abstrahiren. Aehnliches ergiebt sich beim Fortschreiten nach reinen Quinten. Man ist deshalb, um die Reinheit der Octaven zu erhalten, genöthigt, in der Musik die Töne etwas höher oder tiefer zu stimmen, als es die reinen Terzen oder Quinten verlangen; man muß, wie es die Musiker sagen, den Ton etwas oberhalb oder unterhalb schweben lassen. Diese Ausgleichung nennt man die Temperatur. Die nähere Besprechung der verschiedenen Arten der Temperatur würde uns hier zu weit führen.

Wenn unser Ohr empfindlicher wäre, so würde es durch die erwähnte Unreinheit der Terzen und Quinten unangenehm afficirt werden, es würde kaum ein musikalischer Genuß möglich seyn.

Nach den Bezeichnungen, welche wir in diesen Paragraphen kennen gelernt haben, können wir nun auch die verschiedenen Töne näher bezeichnen, welche eine und dieselbe Röhre giebt. Bei einer offenen Röhre nämlich ist der zweite Ton die Octav des Grundtons, bei einer gedeckten Pfeife ist er die Quint der nächst höheren Octav.

Der tiefste Ton, welcher in der Musik zur Anwenduag kommt, ist derje- 100
nige, welchen eine gedeckte Pfeife von 16 Fuß giebt. Nun wissen wir aber, daß, wenn eine gedeckte Pfeife ihren tiefsten Ton giebt, ihre Wellenlänge gerade $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge dieses Tons ist, die Wellenlänge für diesen Ton ist demnach in gewöhnlicher Luft 64 Fuß.

In einer Secunde pflanzt sich der Schall um 1050′ fort; dividirt man diese Zahl durch 64, so findet man, um wieviel Wellenlängen dieser tiefste Ton in einer Secunde fortschreitet oder, was dasselbe ist, wie viel Oscillationen in einer Secunde nöthig sind, um diesen tiefsten Ton der Musik hervorzubringen; man findet die Zahl 16,4.
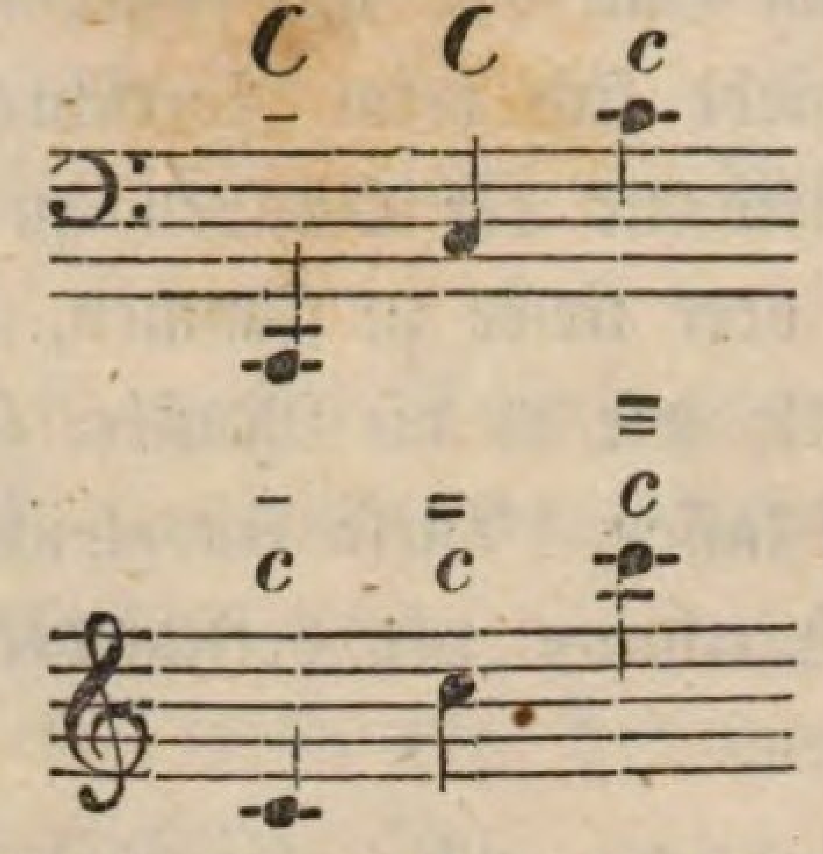
Ebenso findet man die Schwingungszahl des Grundtons einer jeden gedeckten Pfeife, indem man mit der vierfachen Länge der Pfeife (in pariser Fußen ausgedrückt) in 1050 dividirt.

Im Ganzen umfaßt die Musik 9 Octaven. Der erwähnte tiefste Ton einer 16füßigen gedeckten Pfeife wird mit $\underline{\underline{C}}$ bezeichnet.

Da dieser Ton nun 16,5 Schwingungen in der Secunde macht, so ist Folgendes die Schwingungszahl der auf einander folgenden Octaven dieses Tons:

$\underline{\underline{C}}$	16,5
$\underline{C}$	33
C	66
c	132
$\overline{c}$	264
$\overline{\overline{c}}$	528.

Mit unseren Noten werden die Töne folgendermaßen bezeichnet:



101 **Töne gespannter Saiten.** Die wichtigsten Gesetze der Schwingungen gespannter Saiten sind folgende:

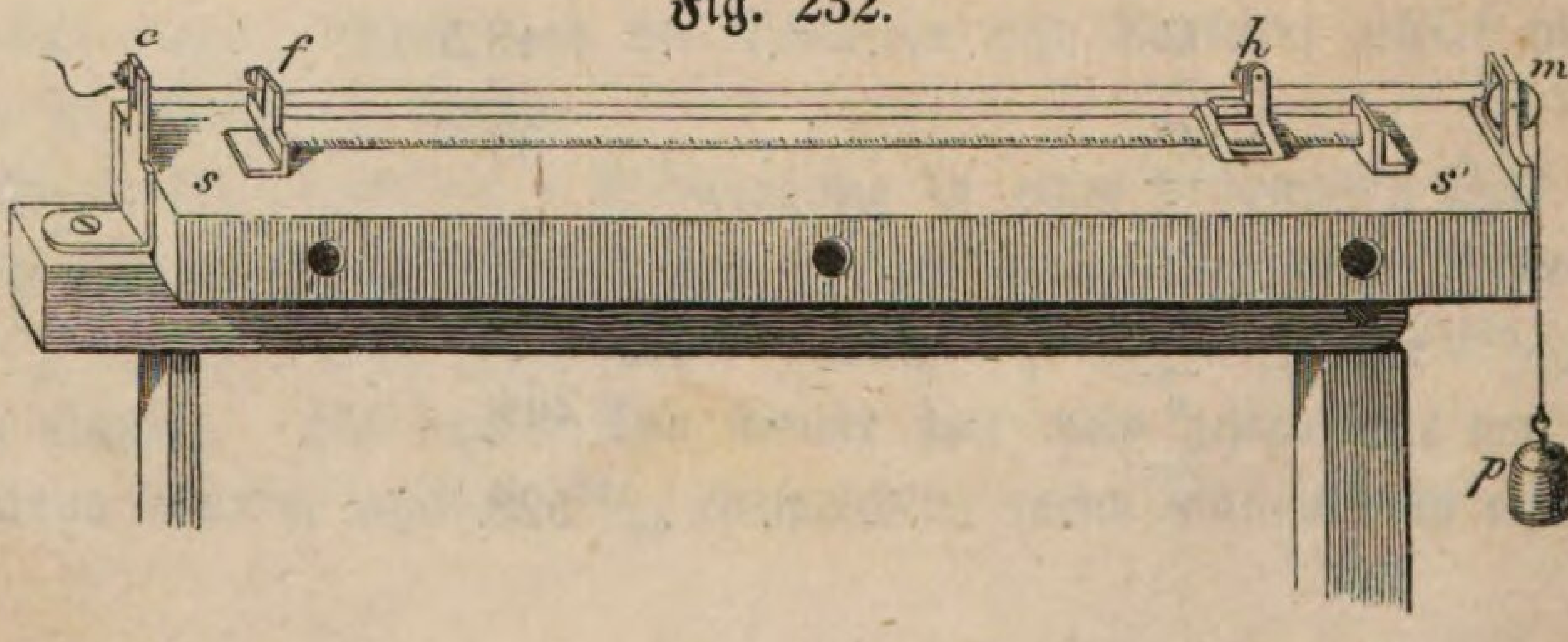
1) *Die Schwingungszahl einer Saite verhält sich umgekehrt wie ihre Länge*, d. h. wenn eine Saite, die auf irgend ein Instrument, wie eine Violine, eine Guitarre u. s. w., aufgespannt ist, in einer gegebenen Zeit eine bestimmte Anzahl von Schwingungen macht, so macht sie in derselben Zeit 2mal, 3mal, 4mal u. s. w. so viel Schwingungen, wenn man bei unveränderter Spannung nur $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ u. s. w. der ganzen Länge schwingen läßt; sie würde $\frac{3}{2}$-, $\frac{4}{3}$-, $\frac{5}{4}$mal so schnell schwingen, wenn man nur $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{5}$ der ganzen Länge schwingen ließe.

2) *Die Zahl der Schwingungen einer Saite ist der Quadratwurzel aus den spannenden Gewichten proportional*, d. h. wenn das Gewicht, welches die Saite spannt, 4-, 9-, 16mal so groß gemacht wird, während die Länge unverändert bleibt, so wird die Geschwindigkeit der Schwingungen 2-, 3-, 4mal so groß.

3) *Die Schwingungszahlen verschiedener Saiten derselben Materie verhalten sich umgekehrt wie ihre Dicke.* Wenn man z. B. zwei Stahlsaiten von gleicher Länge nimmt, deren Durchmesser sich wie 1 zu 2 verhalten, so wird die dünnere bei gleicher Spannung in derselben Zeit doppelt so viel Schwingungen machen als die dickere. Für Darmsaiten ist dieses Gesetz wohl nicht immer genau wahr, weil sie nicht immer absolut genau aus derselben Materie gemacht sind.

Um die wichtigsten Gesetze der Oscillationen der gespannten Saiten und ihrer Töne durch den Versuch nachzuweisen, bedient man sich eines Instrumentes, welches reine Töne giebt und welches erlaubt, die Länge der Saiten mit Genauigkeit zu messen. Dieses Instrument heißt *Monochord*. Fig. 232 stellt

Fig. 232.



ein solches Monochord dar; man kann eine Darmsaite oder eine Metallsaite aufspannen, um zu zeigen, daß beide denselben Gesetzen folgen. Die Saite ist bei *c* eingezwängt und geht bei *f* und *h* über eine Art von Steg, dann über eine Rolle *m* weg und ist endlich mit einem Gewichte *p* belastet. Der bewegliche Steg *h* kann an der Saite hin verschoben werden, ohne sie zu berühren; man stellt ihn an einer beliebigen Stelle fest und kann dann die Saite mit einer Preßschraube einklemmen. Der hohle Kasten *s s'* dient, um den Ton zu verstärken. Nehmen wir nun an, die Saite sey hinlänglich gespannt, um frei schwingend einen vollen und reinen Ton zu geben, den wir als Ausgangspunkt für *c* annehmen, so kann man durch Verschieben des beweglichen Steges es dahin bringen, daß die Saite der Reihe nach die Töne *d*, *e*, *f*, *g*, *a*, *h*, *c* giebt. Bezeichnen wir die Länge der Saite, welche den Grundton *c* giebt, mit 1, so ergeben sich für die anderen Töne folgende Saitenlängen:

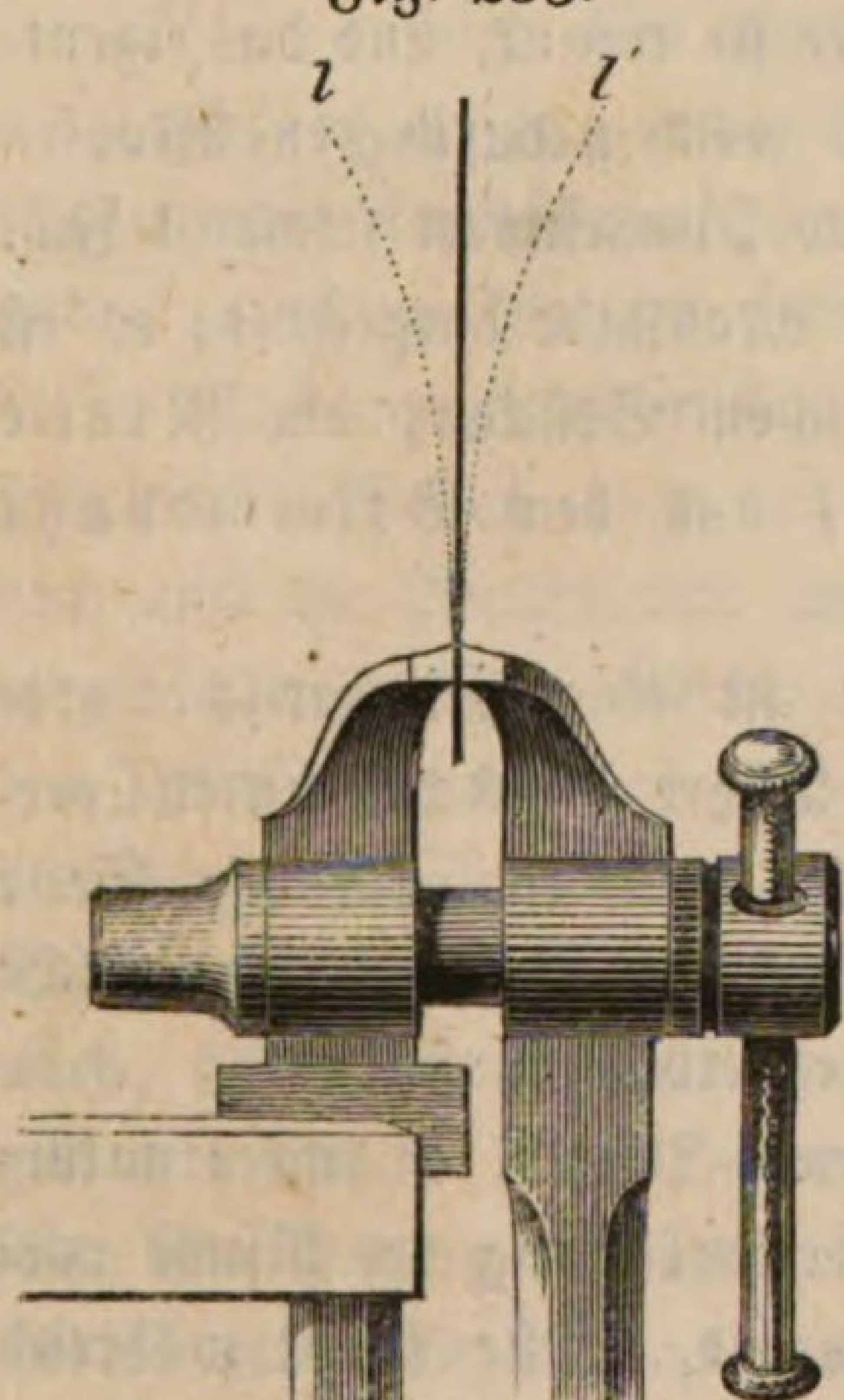
Namen der Töne . . .	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*a*	*h*	*c*
Entsprechende Saitenlängen .	1	$^8/_9$	$^4/_5$	$^3/_4$	$^2/_3$	$^3/_5$	$^8/_{15}$	$^1/_2$.

Man muß also die Saite halb so lang machen, damit sie unter übrigens gleichen Umständen die Octav giebt. Da die Octav aber doppelt so viel Schwingungen macht als der Grundton, so macht also eine halb so lange Saite doppelt so viel Schwingungen.

Um die Quint zu erhalten, muß man die Saite auf $^2/_3$ ihrer Länge verkürzen, die Quint macht aber in gleicher Zeit $^3/_2$mal so viel Schwingungen als der Grundton.

Die Schwingungszahl der Saiten verhält sich also in der That umgekehrt wie ihre Länge.

Fig. 233.



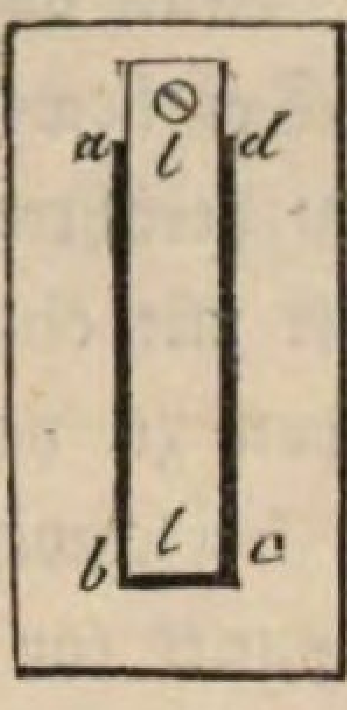
Um bei gleicher Länge der Saiten die Octav zu erhalten, muß man ein 4faches, um die Quint zu erhalten, ein $^9/_4$faches Gewicht anhängen.

Gesetze der Vibrationen von Streifen und Stäben. Wenn ein Streifen oder ein Stab an einem Ende befestigt ist, Fig. 233, und man ihn mit einem Fiedelbogen streicht oder auch nur mit der Hand aus der Gleichgewichtslage bringt, so macht er zwischen *l* und *l'* eine Reihe von Vibrationen, welche, wenn sie schnell genug sind, einen Ton hervorbringen. Wenn man demselben Streifen verschiedene Längen giebt, so verhält sich die Zahl der in gleichen Zeiten gemachten Vibrationen umgekehrt wie die Quadratwurzel der schwingenden Längen. 102

Von den Zungenpfeifen. Eine Zunge ist im Allgemeinen eine vibrirende Platte, welche durch einen Luftstrom in Bewegung gesetzt wird. Es stelle 103

z. B. Fig. 234 eine Platte von Metall dar, welche 2 bis 3 Millimeter dick ist;

Fig. 234.



in derselben sey eine rechteckige Oeffnung *a b c d*, 3 Centimeter lang und 7 bis 8 Millimeter breit, und über derselben sey eine sehr dünne und sehr elastische Messingplatte *l* befestigt, wie die Figur zeigt. Diese Platte kann vibriren, indem sie an den Rändern *a b*, *b c* und *c d* hinstreift. Man hat auf diese Weise ein ganz einfaches Zungenwerk, und um es in Bewegung zu setzen, braucht man nur die Platte der Länge nach auf die Lippen zu setzen und so zu blasen, daß der Wind gegen das freie Ende der Platte *l* gerichtet ist. Der Luftstrom versetzt sie in Schwingungen, die Oeffnung wird abwechselnd geöffnet und geschlossen, bald strömt die Luft aus, bald ist der Strom gehemmt; auf diese Weise entstehen Schallschwingungen, deren Länge von der Anzahl der Vibrationen abhängt, welche die Platte *l* nach ihren Dimensionen und ihrer Elasticität in einer gegebenen Zeit machen kann. Der Ton ist derselbe, als ob die Platte durch mechanische Mittel in Schwingungen versetzt würde, nur ist er bei weitem intensiver. Wenn man auf einer und derselben Platte mehrere solcher Streifen befestigt, welche die auf einander folgenden Töne einer Tonleiter geben, so kann man auf diese Weise ein Instrument machen, welches geeignet ist, um darauf Melodien zu spielen.

Die Töne der sogenannten Blasbalgharmonika werden durch solche Zungenpfeifen hervorgebracht. Den Wind giebt hier nicht der Mund, sondern der Blasbalg.

Das Zungenwerk der Orgeln beruht auf demselben Principe, nur ist hier die Zunge anders befestigt. Man unterscheidet daran zwei aneinander stoßende Röhren, *t* und *t'*, Fig. 235, einen Stopfen *b*, welcher sie trennt, und das eigentliche Zungenwerk, welches durch den Stopfen hindurchgeht. Das Zungenwerk selbst ist Fig. 236 in größerem Maßstabe dargestellt; es ist aus drei wesentlichen Stücken, der **Rinne** *r*, der **Zunge** *l* und dem **Stimmdraht** zusammengesetzt.

Fig. 235.

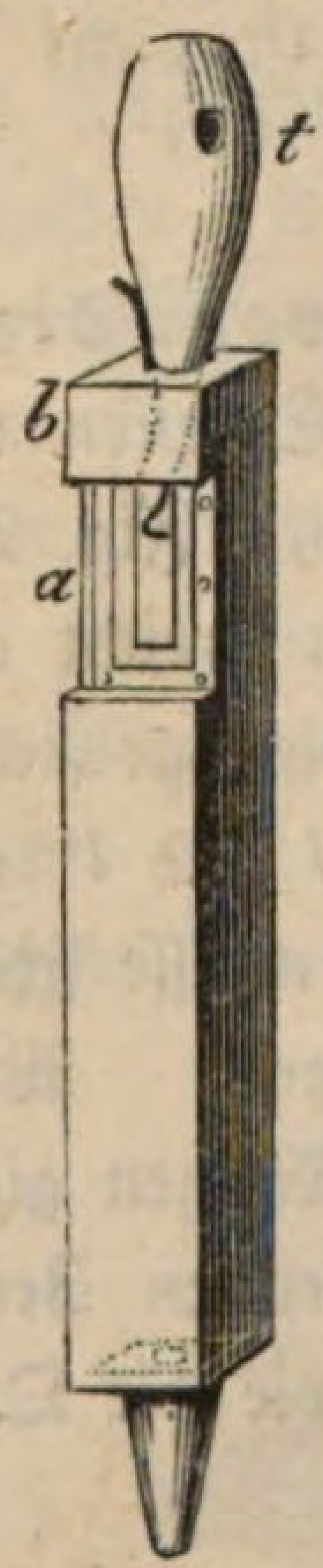
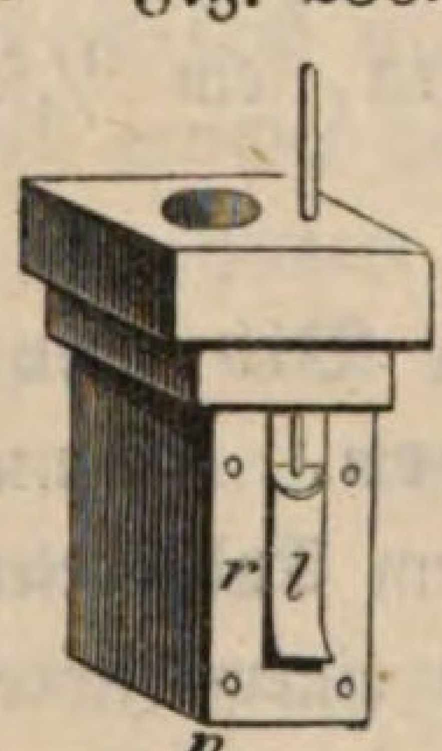


Fig. 236.



Die Rinne ist eine prismatische oder halb cylindrische Röhre, welche unten verschlossen und oben offen ist, auf der Seite aber noch eine Oeffnung hat, durch welche die beiden Röhren mit einander verbunden sind.

Die Zunge ist die vibrirende Platte; in ihrer natürlichen Lage verschließt sie die Seitenöffnung der Rinne entweder ganz oder doch fast ganz, d. h. sie streift während ihrer Oscillationen mit den drei freien Rändern an den Rändern der Oeffnung; die vierte Seite ist entweder durch eine Schraube oder durch Löthung an der Röhre befestigt.

Der Stimmdraht ist ein starker Metalldraht, welcher unten doppelt ge-

krümmt ist und seiner ganzen Breite nach die Zunge andrückt. Er läßt sich mit einiger Reibung in dem Stopfen auf- und abschieben, und dadurch ist es möglich, den schwingenden Theil der Zunge zu verlängern oder zu verkürzen, denn der Theil, welcher über dem Stimmdrahte ist, kann nicht schwingen.

Der Wind des Blasbalgs tritt durch den Fuß der Röhre ein und drückt gegen die Zunge, um sich einen Ausweg zu verschaffen, dringt dann durch die Rinne und tritt aus der Röhre *t* aus. Die auf diese Weise aus der Gleichgewichtslage gebrachte Zunge kehrt alsbald, vermöge ihrer Elasticität, zurück und macht Schwingungen, welche so lange dauern als der Luftstrom anhält. Die Fig. 235 stellt eine Zungenpfeife dar, an welcher der der Zunge gegenüberstehende Theil der Röhre von Glas ist, damit man das Spiel dieser Zunge besser beobachten könne.

Fig. 237.



Bei Orgeln sind die Zungenpfeifen oft etwas anders construirt, nämlich so, daß die Ränder der Zunge auf die Ränder der Rinne aufschlagen, wie man Fig. 237 sieht.

Wenn eine Zungenpfeife für sich in freier Luft schwingt, wenn also keine oder nur eine verhältnißmäßig kurze Röhre über ihr angebracht ist, so hängt ihr Schwingungsgeschwindigkeit, also der Ton, den sie giebt, von ihrer Elasticität und von ihren Dimensionen ab; wenn aber eine lange Röhre aufgesetzt wird, so modificirt diese den Ton wesentlich; die Bewegung der Zunge hängt dann mehr von der Bewegung der in der langen Pfeife hin und her laufenden Luftwellen als von ihrer eigenen Elasticität ab; sie wird also eigentlich mehr geschwungen als sie selbst schwingt.

Mittheilung der Schallschwingungen zwischen festen, flüs- 104
sigen und luftförmigen Körpern. Wenn mehrere feste Körper unter einander zu einem Ganzen verbunden sind, so verbreiten sich die von einem Theile dieses Systems ausgehenden Vibrationen mit der größten Leichtigkeit als fortschreitende Wellen über die ganze Masse; an der Gränze angekommen, gehen nun aber die Wellen nur theilweise in das angränzende Mittel, einen luftförmigen oder flüssigen Körper, über, theilweise aber werden sie reflectirt, und durch die Interferenz der reflectirten Wellen mit den neu ankommenden bilden sich in den einzelnen Theilen des festen Systems stehende Schwingungen. Ein solches System bildet ein Ganzes, welches, wenn ein Punkt in Schwingungen versetzt wird, sich in einzelne schwingende Theile abtheilt, die durch Schwingungsknoten getrennt sind. Jeder einzelne Theil verliert gewissermaßen seine Individualität, seine Verbindung mit den benachbarten Stücken hindert ihn so zu schwingen, wie es geschehen würde, wenn er allein wäre.

Während sich die Schallwellen leicht über ein System von festen Körpern verbreiten, gehen sie nicht so leicht von einem festen Körper auf einen flüssigen, weniger leicht auf einen gasförmigen über; so kommt es denn, daß mancher ziemlich stark vibrirende feste Körper doch nur einen ganz schwachen Ton hören

läßt, nur weil er seine Schwingungen der Luft nicht gehörig mittheilen kann. Dies ist z. B. bei der Stimmgabel der Fall, welche, stark angeschlagen und frei in der Luft gehalten, doch nur einen ganz schwachen Ton hören läßt.

Um den Ton eines solchen Körpers zu verstärken, muß man die Mittheilung seiner Schwingungen an die Luft durch Resonanz, d. h. dadurch befördern, daß man die stehenden Schwingungen des tönenden Körpers noch auf einen anderen zu übertragen sucht. Ein Mittel dazu haben wir schon kennen gelernt, die schwachtönenden, aber doch stark vibrirenden Körper vor eine Röhre von entsprechender Länge zu bringen und so die Luftmasse in derselben zum Mittönen zu bringen.

Ein zweites Mittel, den Ton zu verstärken, besteht darin, den tönenden Körper mit einem anderen leicht in Schwingungen zu versetzenden Körper von verhältnißmäßig großer Oberfläche in Berührung zu bringen. Es bilden sich dann auf diesem, wie schon erwähnt wurde, ebenfalls stehende Schallschwingungen, und diese theilen sich, der großen Oberfläche des mittönenden (resonirenden) Körpers wegen, der Luft leichter mit. Setzt man z. B. die stark angeschlagene, aber in freier Luft schwach tönende Stimmgabel auf einen Kasten von dünnem, elastischem Holze, so hört man den Ton ungleich stärker. Darauf beruht die Anwendung des Resonanzbodens in verschiedenen musikalischen Instrumenten. Bei Flöten, Orgelpfeifen u. s. w. ist kein Resonanzboden nöthig, weil hier die stehenden Schwingungen einer Luftmasse den Ton geben, und diese sich ganz leicht der umgebenden Luft mittheilen.

So wie Vibrationen fester Körper Schallwellen in der Luft erzeugen, so können auch umgekehrt Schallwellen, die, sich in der Luft verbreitend, einen festen Körper treffen, diesen zum Vibriren bringen. So sieht man z. B. die Saite eines Instruments in Schwingungen gerathen, wenn sie von den Schallwellen des Tons, welchen sie selbst giebt, oder eines seiner harmonischen Töne getroffen wird; so zittern die Fensterscheiben heftig unter dem Einflusse gewisser Töne der Stimme, oder des Knalls einer Kanone. Diese Erscheinung, welche man so auffallend an leicht beweglichen Körpern wahrnimmt, findet auch bei größeren Massen und weniger elastischen Körpern Statt; alle Pfeiler und Mauern eines Domes erzittern mehr oder weniger beim Läuten der Glocken.

Drittes Kapitel.

Von der Stimme und dem Gehör.

Das Stimmorgan. Es ist bekannt, daß die Luftröhre eine Röhre 105
ist, welche auf der einen Seite mit dem Schlunde, auf der anderen in den Lungen endigt. Ihre wesentlichste Function ist, die Luft durchzulassen, sey es nun beim Ein- oder beim Ausathmen; sie ist fast cylindrisch und aus knorpeligen Ringen zusammengesetzt, welche durch biegsame häutige Ringe verbunden sind. Am unteren Ende theilt sie sich in zwei Röhren, die Bronchien, von denen die eine rechts, die andere links geht. Jeder dieser Aeste verzweigt sich weiter nach allen Seiten hin in das Gewebe der Lunge. Oben endigt die Luftröhre mit dem Kehlkopfe, welcher vorzugsweise das Stimmorgan ist.

Der Kehlkopf besteht aus vier Knorpeln, welche erst im späteren Alter verknöchern, nämlich dem Ringknorpel, dem Schildknorpel und den beiden Gießkannenknorpeln. Diese Knorpel sind unter sich und mit dem oberen Ringe der Luftröhre verbunden und können durch verschiedene Muskeln auf das Mannichfaltigste bewegt werden. Die innere Wand des Kehlkopfes bildet eine Verlängerung der Luftröhre, die immer enger wird, bis zuletzt nur eine von vorn nach hinten gerichtete Spalte, die Stimmritze übrig bleibt. Die Ränder dieser Stimmritze sind größtentheils durch die Stimmbänder gebildet. Nach vorn hin sind diese Stimmbänder an dem Schildknorpel, am entgegengesetzten Ende aber ist das eine Stimmband an dem einen, das andere Stimmband an dem anderen Gießkannenknorpel angewachsen, so daß, je nachdem die Knorpel durch die entsprechenden Muskeln mehr genähert oder entfernt werden, die Stimmbänder mehr oder weniger gespannt sind und die Stimmritze größer oder kleiner wird. Die Stimmbänder selbst bestehen aus einem sehr elastischen Gewebe.

Ueber den Lippen der Stimmritze befinden sich zwei sackartige Höhlungen, die eine auf der rechten, die andere auf der linken Seite, welche sich 8 bis 9 Linien weit seitwärts erstrecken und eine Höhe von 5 bis 6 Linien haben; es sind dies die ventriculi Morgagni. Die oberen Ränder dieser Ventrikeln bilden gleichsam eine zweite Stimmritze, welche 5 bis 6 Linien über der anderen liegt. Die obere Stimmritze kann durch den Kehldeckel, welcher eine fast dreieckige Haut oder vielmehr ein Knorpel ist, verdeckt werden; dieser Kehldeckel ist mit der einen Seite nach vorn hin angewachsen und verhindert, wenn er die Stimmritze verdeckt, daß Speisen und Getränke in die Luftröhre gerathen können, indem diese über den Kehldeckel hinweg in den Schlund gelangen.

Der Bau des Kehlkopfes wird durch beistehende Figuren deutlicher werden. Fig. 238 stellt denselben von vorn, Fig. 239 von der Seite, Fig. 241 von hinten, Fig. 240 von oben, mit Hinweglassung der Muskeln, dar, welche die Knorpel bewegen und dadurch die Stimmbänder spannen. In allen diesen Figuren ist der Ringknorpel mit *a*, der Schildknorpel mit *b*, die Gießkannenknorpel mit *c*, der Kehldeckel mit *d* bezeichnet. Der Kehldeckel ist, um Alles deutlicher sehen zu können, in die Höhe gerichtet dargestellt. In Fig 240 sieht man die Stimmritze, welche durch die zwischen dem Schildknorpel und den

Fig. 238.

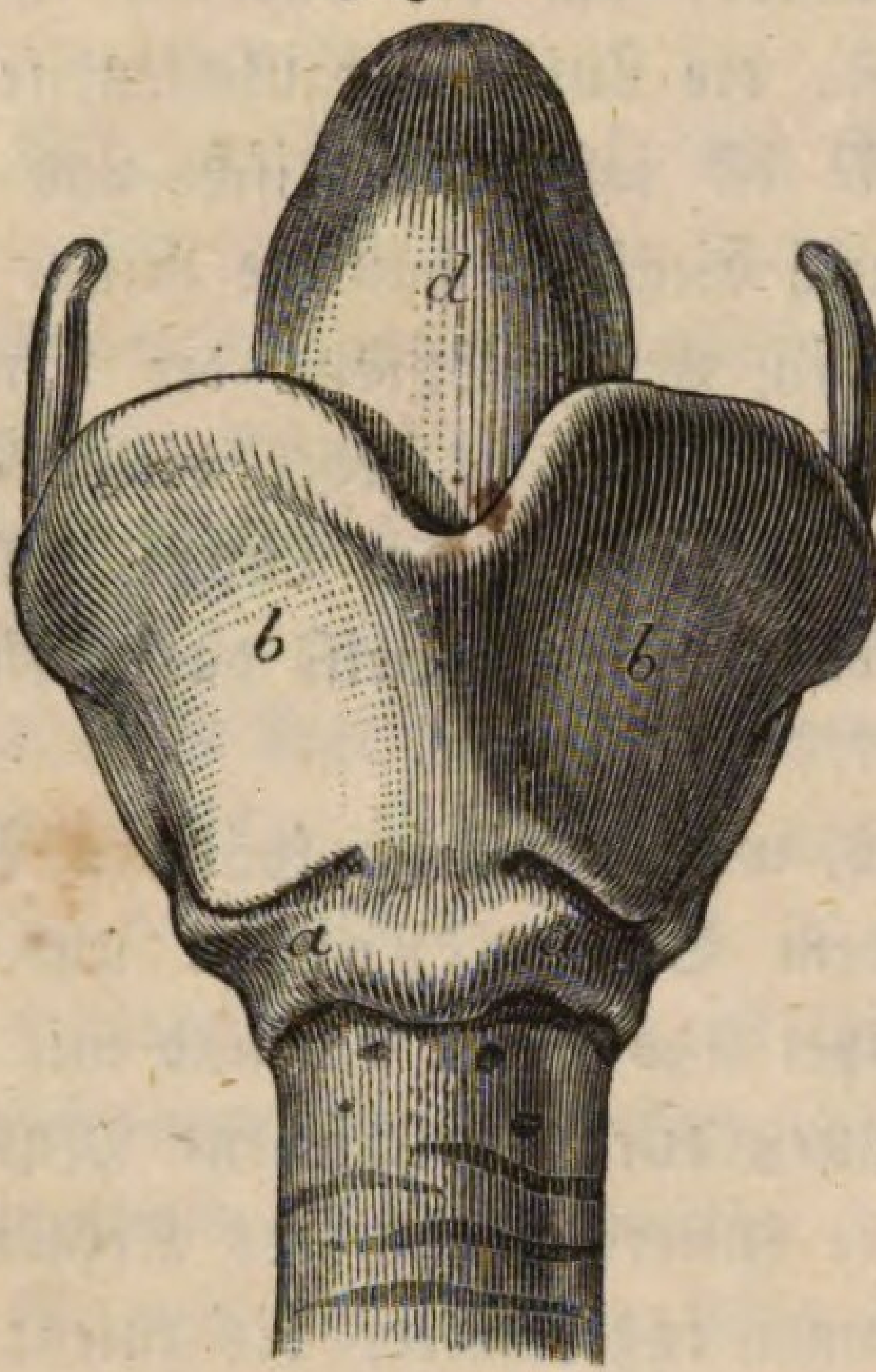


Fig. 239.

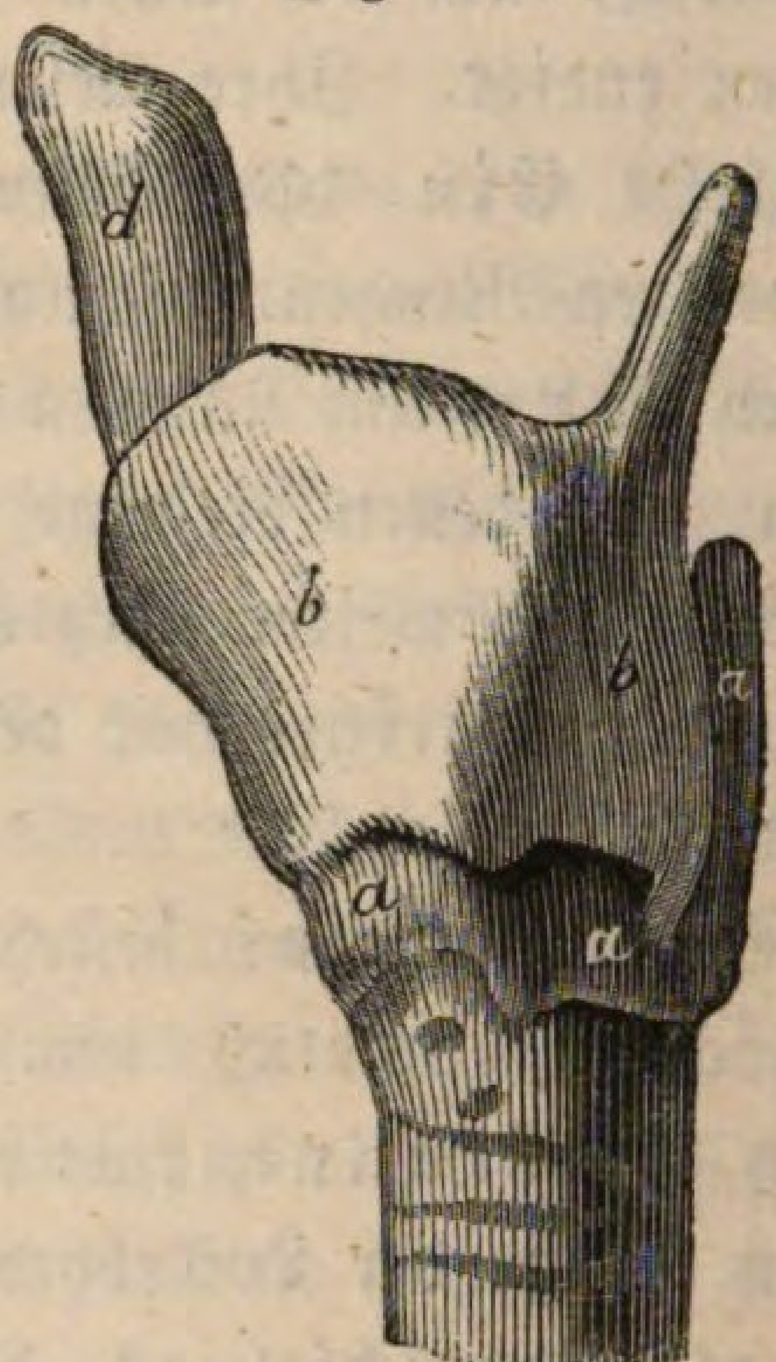


Fig. 240.

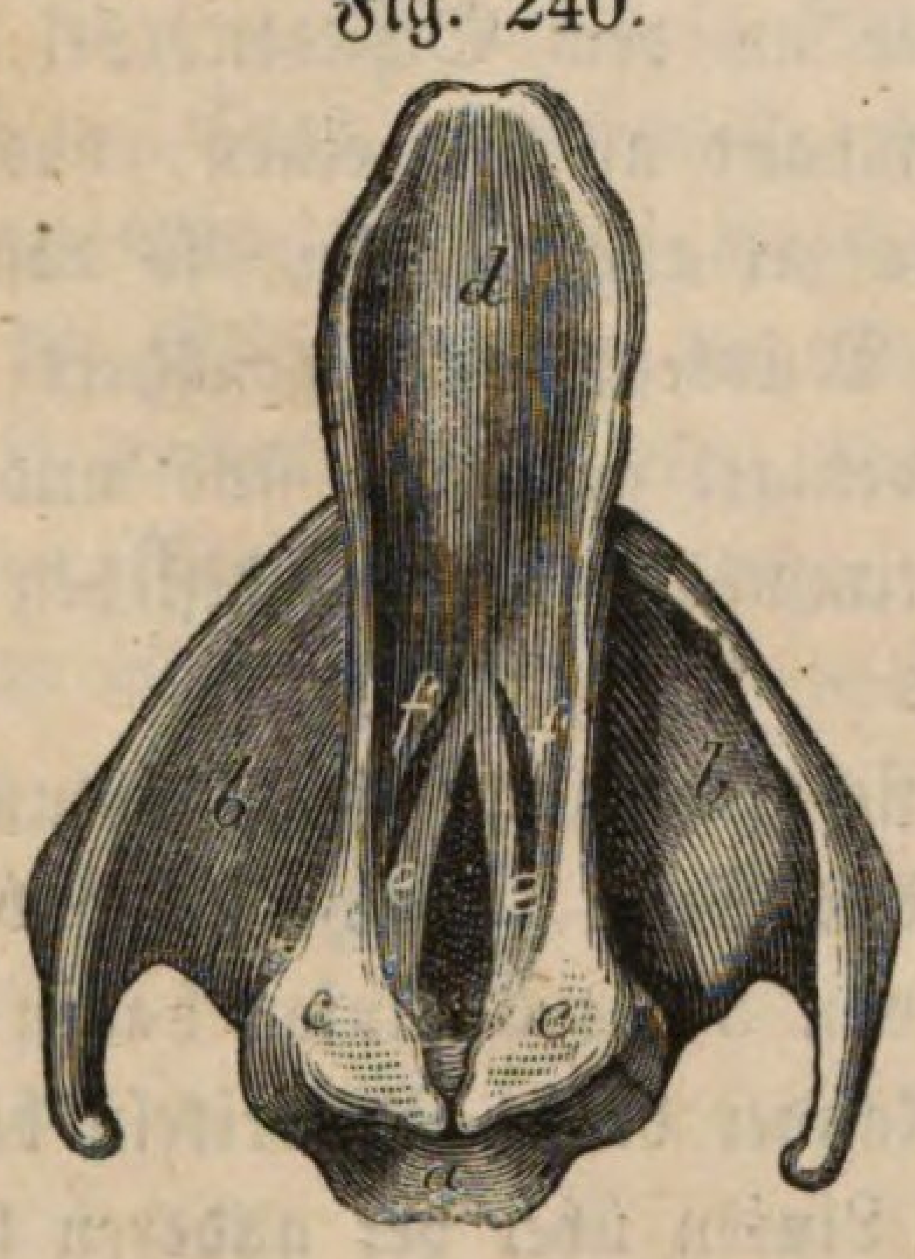
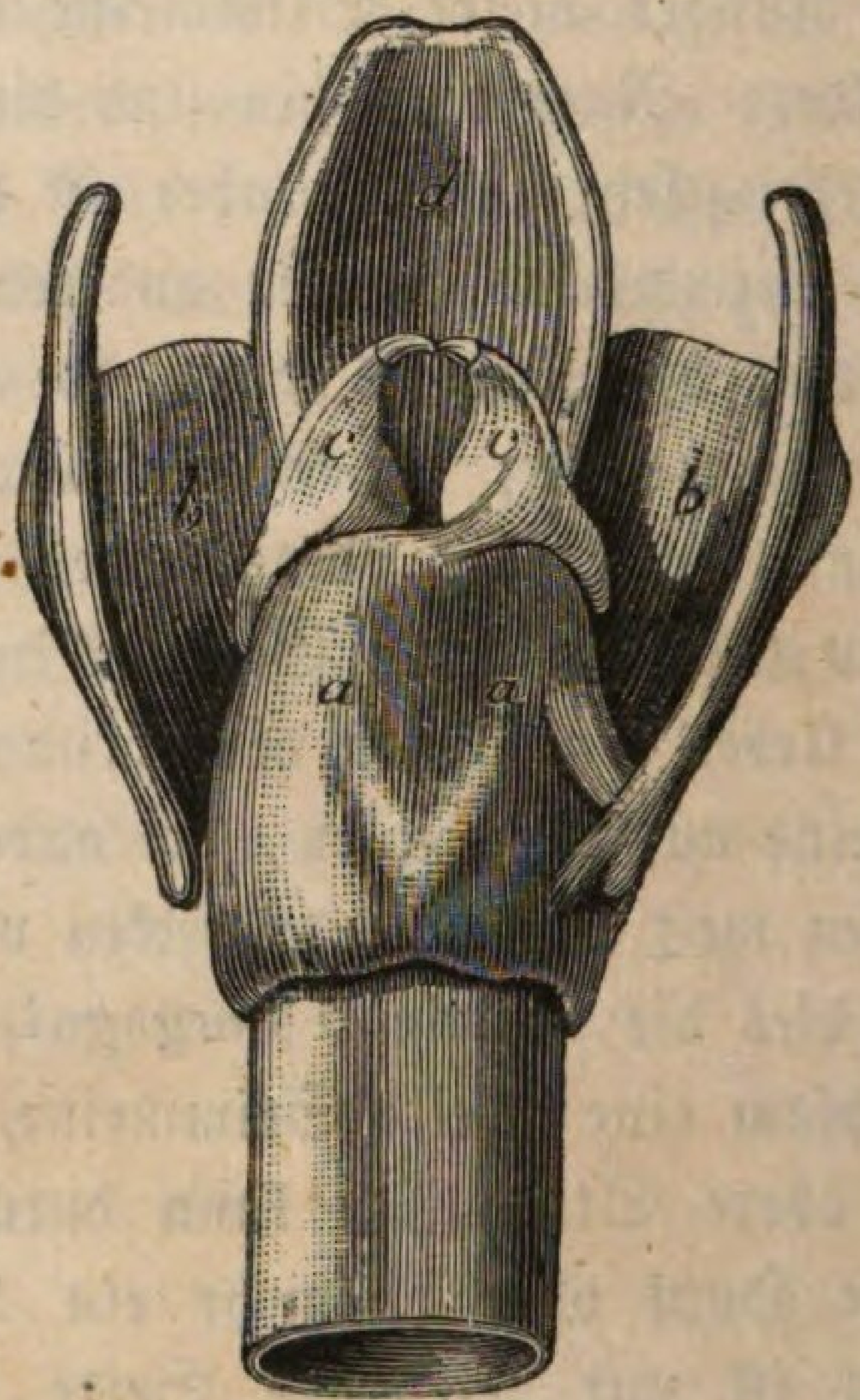


Fig. 241.

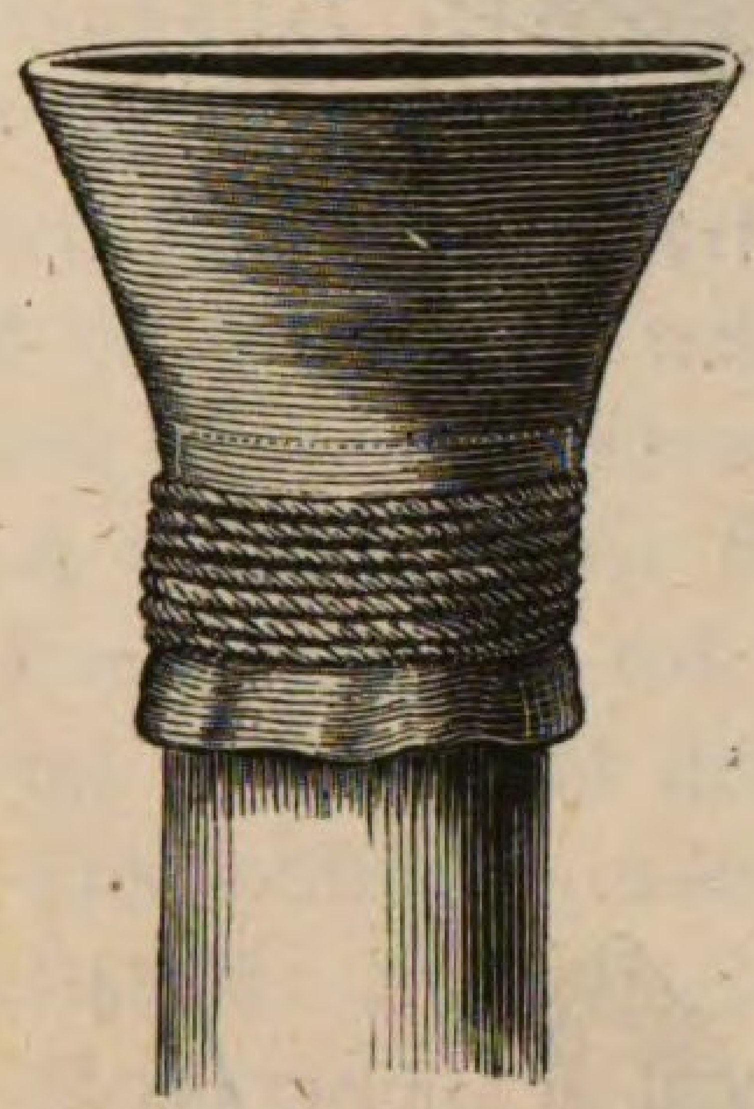


Gießkannenknorpeln ausgespannten unteren Stimmbänder gebildet wird; in derselben Figur sieht man auch die oberen Stimmbänder nebst den zwischen ihnen und den unten gelegenen ventriculis Morgagni.

Die Bildung von Tönen im Kehlkopfe ist der in Zungenpfeifen ganz ähnlich. Ein Zungenwerk beruht darauf, daß ein Körper, der für sich durch Anstoßen entweder gar keine, oder doch nur schwache und klanglose Töne hervorbringt, durch den continuirlichen Stoß der Luft einen Ton erzeugt, welcher seiner Länge und seiner Elasticität entspricht. Bei dem Kehlkopfe sind es die Schwingungen der Stimmbänder, durch welche die Stimmritze in rascher Abwechselung mehr geschlossen und wieder geöffnet wird, welche den Ton veranlassen, wie man sich leicht mittelst der folgenden, den Kehlkopf nachahmenden Vorrichtung überzeugen kann.

Man verfertigt jetzt ganz dünne Platten von Kautschuk (gummi elasticum). Aus einer solchen Platte schneide man ein ungefähr $1\frac{1}{2}$ Zoll langes Stück aus, welches so breit ist, daß es sich um ein Glasrohr von ungefähr 6 bis 7 Linien Durchmesser gerade herumlegen läßt; man legt dieses Kautschukstück nun so um den Glascylinder, daß die eine Hälfte auf dem Glase liegt, die andere Hälfte vorragt; wenn man die frischen Schnittränder der Kautschukplatte, welche auf diese Weise an einander stoßen, fest an einander drückt, so haften sie fest zusammen, und man erhält so einen Kautschukcylinder, welcher auf einem Glascylinder so steckt, das seine eine Hälfte noch vorragt; man bindet nun den Kautschukcylinder auf das Glas fest, wie man Fig. 242 sieht. Wenn man nun die Kautschukröhre an ihrem oberen Ende an zwei gegenüber liegenden Punkten faßt und auseinanderzieht, so bildet sich eine Ritze, wie man Fig. 242 sieht, deren Ränder von Kautschuk sind, und wenn man dann unten in das Rohr hineinbläst, so erhält man einen Ton, der um so höher wird, je stärker die beiden Lippen angespannt werden. Man kann dabei ganz deutlich die Vibrationen der Kautschuklippen sehen, welche die Ritze bilden.

Fig. 242.



Die Höhe und Tiefe der Töne des Kehlkopfes hängt ebenfalls von der Spannung der Stimmbänder ab.

Das Gehörorgan besteht aus drei Haupttheilen, dem äußeren Ohre, 106
welches durch die Ohrmuschel und den Gehörgang gebildet wird, der Trommelhöhle, welche von dem Gehörgange durch das Trommelfell getrennt ist, und dem Labyrinthe. Das Labyrinth besteht aus knöchernen Höhlungen, welche mit einer Flüssigkeit angefüllt sind, in welcher sich der Gehörnerv verbreitet; um auf diesen Nerven wirken zu können, müssen die Schallvibrationen der ganz von Knochen umgebenen Flüssigkeit im Labyrinthe mitgetheilt werden, dies geschieht durch zwei Oeffnungen des Labyrinthes, welche in die Trommelhöhle führen; sie heißen das ovale und das runde Fenster; beide Oeffnungen sind mit einem zarten Häutchen überspannt, auf der Mitte der Membran des

ovalen Fensters ist aber die Platte des **Steigbügels**, eines Knöchelchens aufgewachsen, von welchem sogleich näher die Rede seyn wird.

Die Fig. 243 stellt das Labyrinth in stark vergrößertem Maßstabe zum

Fig. 243.

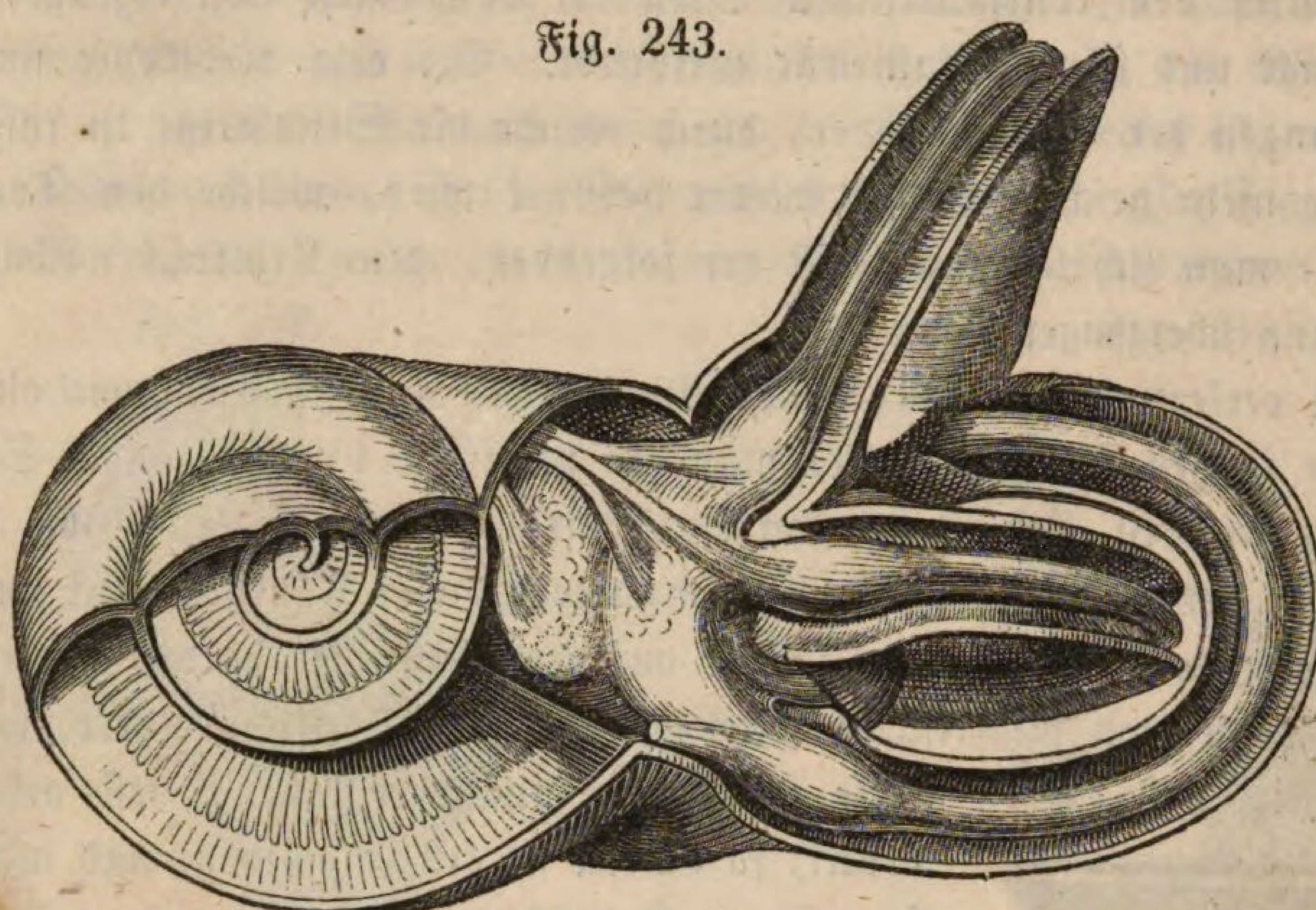
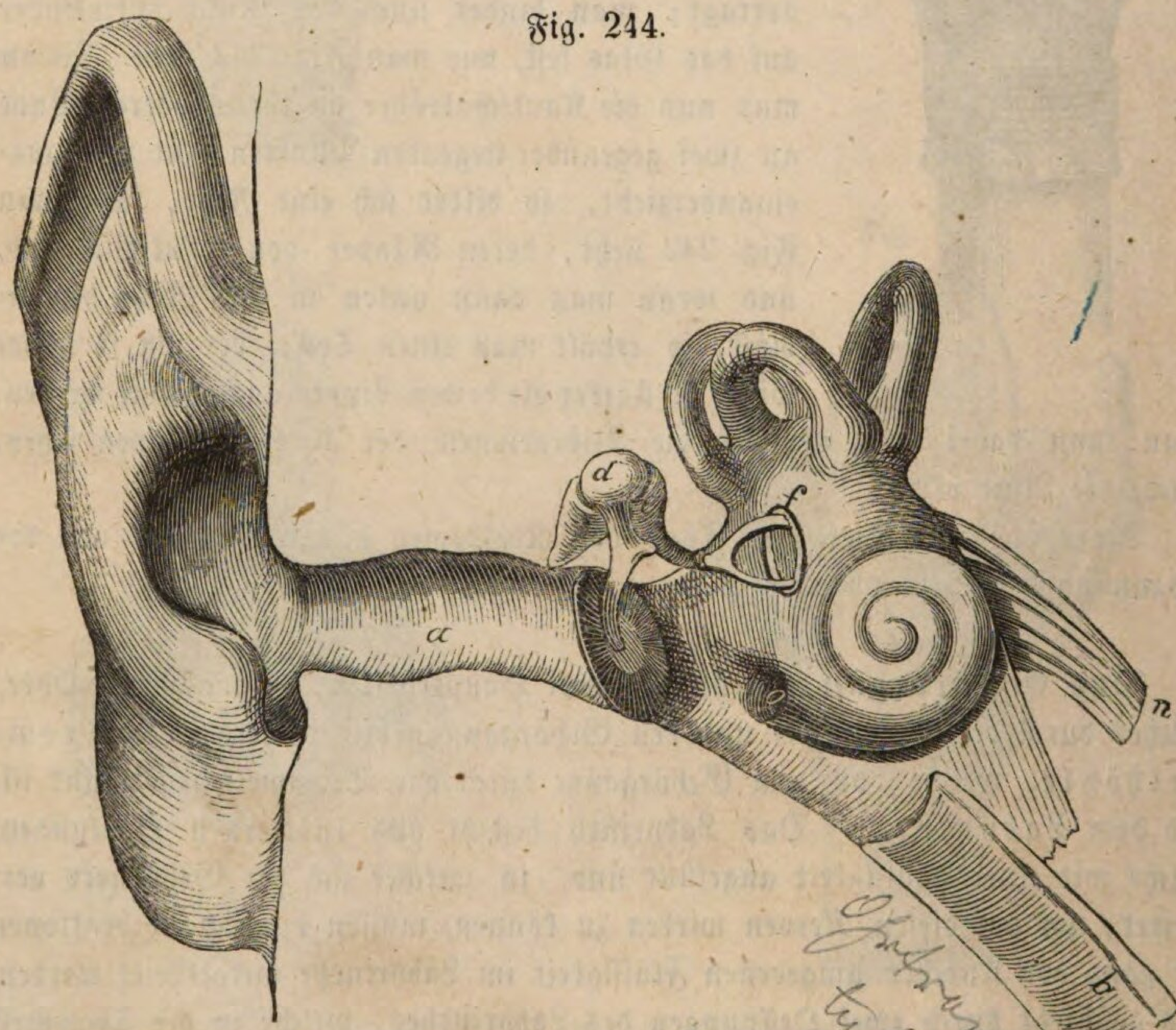


Fig. 244.



Theil geöffnet dar. Es besteht aus drei Haupttheilen, der Schnecke, dem Vorhofe und den halbkreisförmigen Kanälen. Der akustische Nerv verbreitet sich theils in den Vorhof, wo er sich auf die Ampullen, Röhren, welche in den halbkreisförmigen Kanälen liegen und mit einer besonderen Flüssigkeit gefüllt sind, ansetzt, größtentheils aber in ganz feinen Verzweigungen in der Schnecke. Die einzelnen Windungen der Schnecke sind nämlich durch eine diesen Windungen parallele feine knöcherne Scheidewand in zwei Theile getheilt. Diese Scheidewand ist sehr porös und zellig, und in diese Zellen verbreiten sich die letzten Verzweigungen der akustischen Nerven, wie dies in unserer Figur an dem aufgebrochenen Theile der Schnecke zu sehen ist.

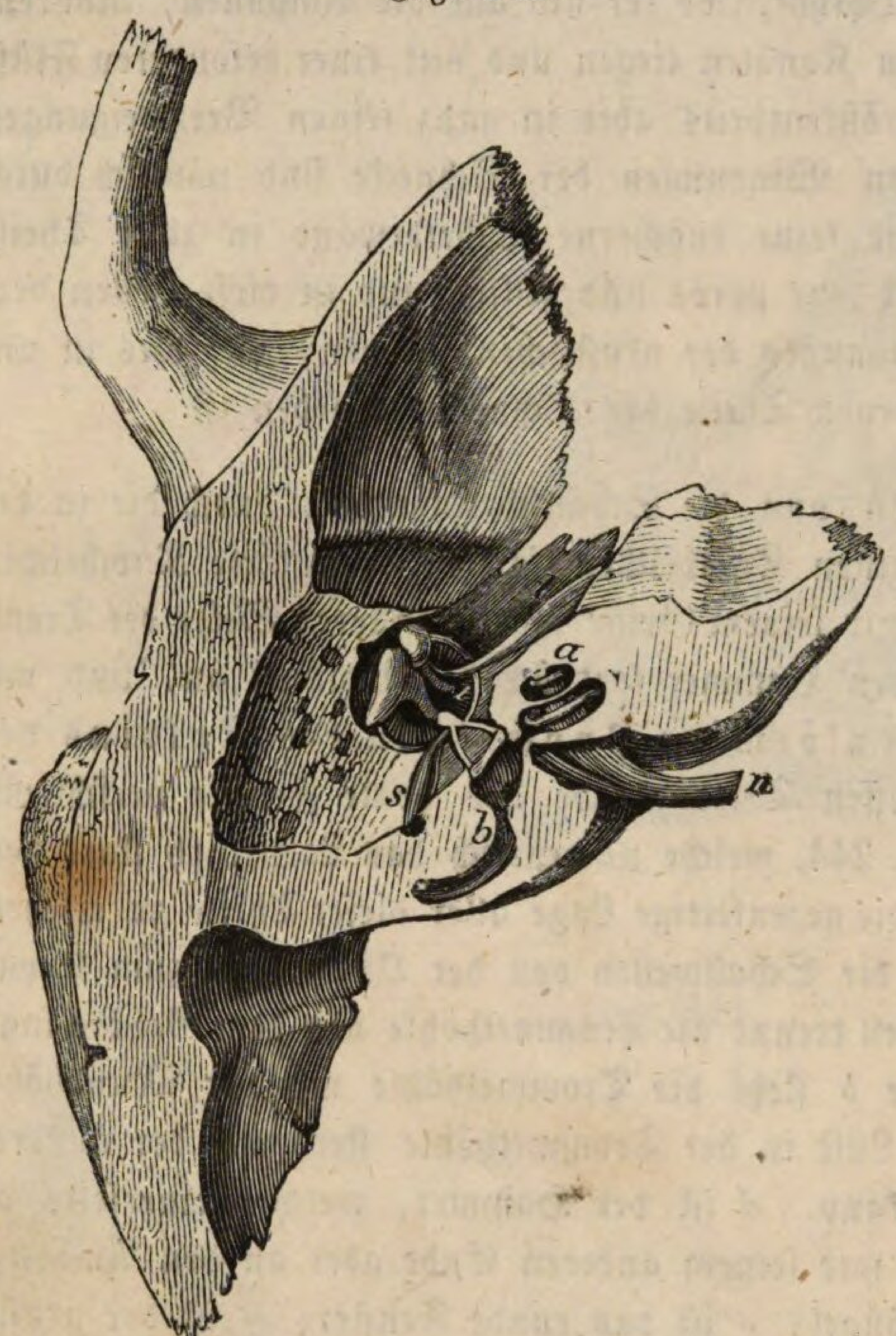
Zu dem Labyrinthe werden nun die Schallschwingungen durch die in der Trommelhöhle befindlichen kleinen Knöchelchen fortgeleitet; diese Knöchelchen sind der Hammer, welcher mit seinem Griffe an der inneren Seite des Trommelfells angewachsen ist; an den Hammer setzt sich der Amboß an, und mit diesem hängt durch das linsenförmige Knöchelchen des Sylvius der Steigbügel zusammen, dessen Tritt gerade das ovale Fenster verschließt. Aus der Uebersichtsfigur, Fig. 244, welche namentlich das Labyrinth stark vergrößert darstellt, ist ungefähr die gegenseitige Lage aller dieser Theile zu ersehen. *a* ist der Gehörgang, welcher die Schallwellen von der Ohrmuschel zum Trommelfelle führt. Das Trommelfell trennt die Trommelhöhle von dem Gehörgange. Durch die Eustachische Röhre *b* steht die Trommelhöhle mit der Mundhöhle in Verbindung, so daß die Luft in der Trommelhöhle stets mit der äußeren sich ins Gleichgewicht stellen kann. *d* ist der Hammer, welcher einerseits an das Trommelfell angewachsen, mit seinem anderen Ende aber an den Amboß *c* angesetzt ist. *f* ist der Steigbügel; *o* ist das runde Fenster; *n* ist der akustische Nerv, welcher sich im Labyrinthe verbreitet.

Die einzelnen Theile des Gehörorgans sind nicht so freiliegend, wie es aus Fig. 244 etwa scheinen möchte; hier ist die knöcherne Hülle, welche Alles einschließt, der Deutlichkeit wegen ganz weggelassen. Der Gehörgang selbst geht durch den Knochen des Schlafbeins hindurch, die Trommelhöhle ist ringsum von Knochenwänden umgeben, und das Labyrinth ist ebenfalls so vollständig in einen Knochen, welcher seiner Härte wegen den Namen des Felsenbeins trägt, eingewachsen, daß man es nur mit Mühe bloßlegen kann. Um eine richtige Vorstellung davon zu geben, wie die einzelnen Theile des Gehörorgans in die Knochenmasse eingewachsen sind, ist in Fig. 245 (s. d. folg. Seite) ein wirklich anatomischer Durchschnitt desselben in natürlicher Größe dargestellt. *a* ist der Durchschnitt der Schnecke, *b* einer der halbzirkelförmigen Kanäle, *n* der Nerv, *i* das Trommelfell; auch der Hammer, Amboß und der Steigbügel sind in der Fig. 245 deutlich zu erkennen.

Die Ohrmuschel dient dazu, die Schallwellen aufzunehmen und durch den Gehörgang zum Trommelfelle hinzuleiten; dadurch nun wird das Trommelfell

in Vibration versetzt, die durch die Gehörknöchelchen und durch die Luft in der Trommelhöhle zum Labyrinthe geleitet werden. Durch den Muskel t kann das Trommelfell mehr oder weniger gespannt und nach innen gezogen, durch den Muskel s kann der Steigbügel bewegt, dadurch aber auch natürlich die Intensität der Mittheilung des Schalls modificirt werden.

Fig. 245.



Das Wesentlichste am Gehörorgane ist der Gehörnerv; daher kann das Trommelfell verletzt und die Reihe der Gehörknöchelchen unterbrochen seyn, ohne daß deshalb das Gehör ganz aufhört; ja bei manchen Thieren, wie bei den Krebsen, besteht das Gehörorgan nur aus einem mit Flüssigkeit gefüllten Bläschen, auf welchem sich der Hörnerv ausbreitet.

Fünfter Abschnitt.

Von dem Lichte.

Einleitung. Alle leuchtenden Körper bestehen wesentlich aus wägbarer 107
Materie; der leere Raum kann wohl das Licht fortpflanzen, aber nicht erzeugen.

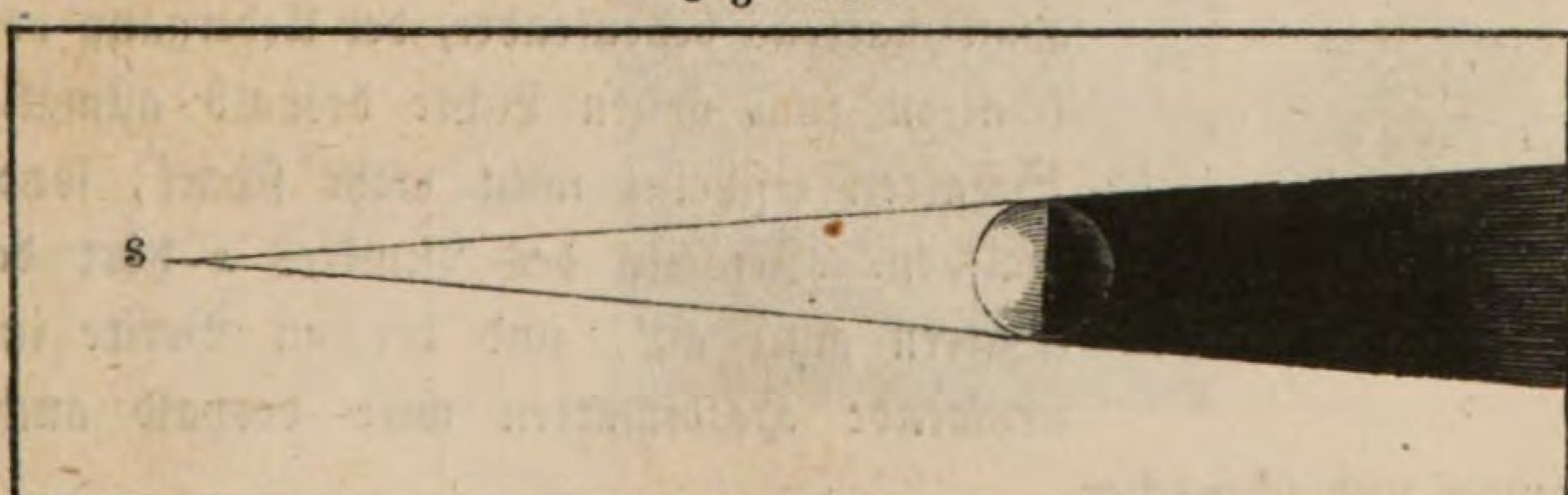
Alle Körper, welche nicht selbstleuchtend sind, theilt man in undurchsichtige Körper, wie Holz, Steine und Metalle; durchsichtige, wie Luft, Wasser und Glas, und durchscheinende, wie dünnes Papier und mattgeschliffenes Glas.

So lange ein Lichtstrahl in einem und demselben gleich dichten Mittel bleibt, pflanzt er sich in gerader Linie fort, wenn er aber einen anderen Körper trifft, so wird er an dessen Oberfläche theilweise zurückgeworfen, reflectirt, theilweise aber dringt er, wenn dieser Körper durchsichtig ist, mit veränderter Richtung in denselben ein, er wird gebrochen. Weiter unten werden wir die Gesetze der Spiegelung und der Brechung näher betrachten.

Die Geschwindigkeit, mit welcher sich das Licht fortpflanzt, ist so groß, daß es alle irdischen Entfernungen in einem unmerkbar kleinen Zeittheilchen durchläuft. Durch Beobachtung der Verfinsterungen der Jupiterstrabanten haben die Astronomen ermittelt, daß das Licht sich so schnell fortpflanzt, daß es den Weg von der Sonne bis zur Erde in nur 8 Minuten und 13 Secunden, also 42000 Meilen in einer Secunde zurücklegt. Eine Kanonenkugel, welche 1200 Fuß in der Secunde zurücklegt, würde, um von der Sonne zur Erde zu gelangen, ungefähr 14 Jahre brauchen.

Schatten und Halbschatten. Eine Folge der geradlinigen Fortpflan- 108
zung des Lichts ist es daß ein den Lichtstrahlen ausgesetzter dunkler Körper

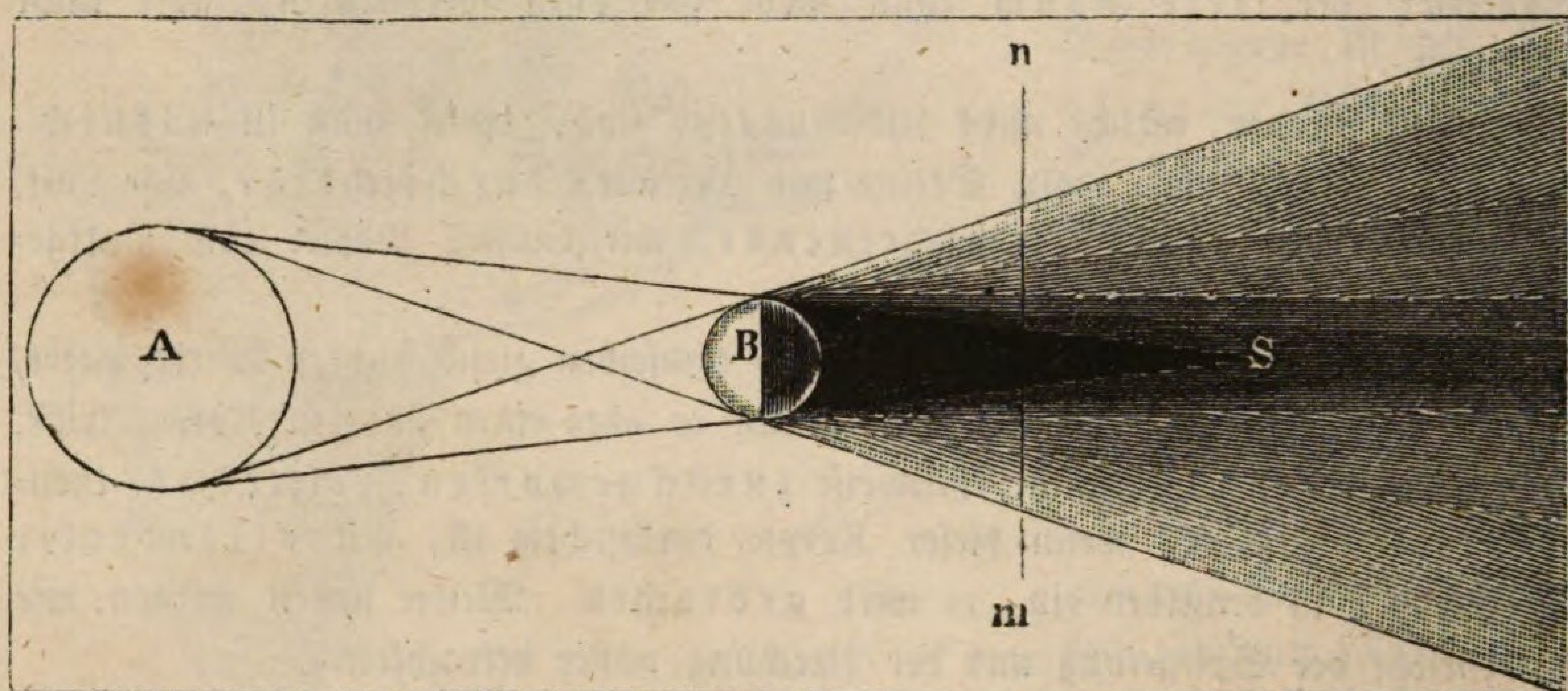
Fig. 246.



einen Schatten wirft; wenn er nur von einem einzigen leuchtenden Punkte aus erleuchtet wird, so ist der Schatten leicht zu bestimmen. Die Gesammtheit aller Linien, welche, von dem leuchtenden Punkte ausgehend, den dunkeln Körper berühren, bildet eine conische Oberfläche, und derjenige Theil derselben, welcher jenseits des dunklen Körpers liegt, bildet die Gränze des Schattens.

Wenn der leuchtende Körper eine namhafte Ausdehnung hat, so ist außer dem Schatten auch noch der Halbschatten zu unterscheiden. Der Schatten, der in diesem Falle auch der Kernschatten genannt wird, ist der Raum, welcher gar kein Licht empfängt, der Halbschatten hingegen ist die Gesammtheit aller der Orte, welche von einigen Punkten des leuchtenden Körpers Licht empfangen, von anderen aber nicht. Es sey z. B. *A*, Fig. 247, eine große

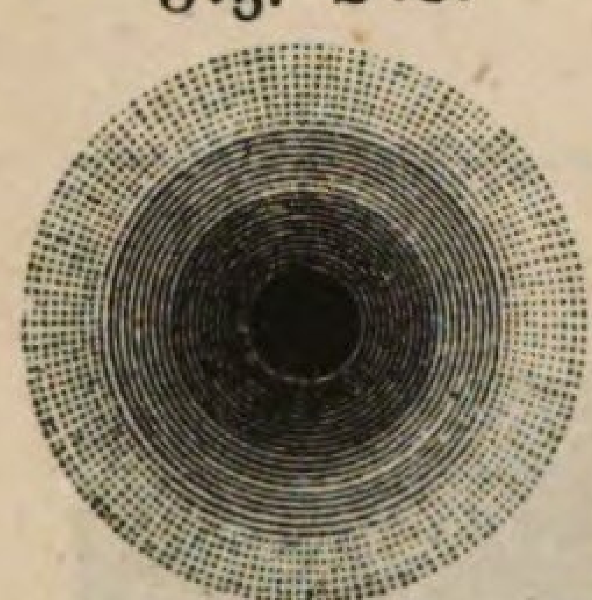
Fig. 247.



leuchtende Kugel, *B* eine kleinere undurchsichtige. Wie weit sich der Kernschatten, wie weit sich der Halbschatten erstreckt, ist aus der Figur deutlich zu ersehen. Durch einen Schirm in *mn* aufgefangen, würde der Schatten das Ansehen Fig. 248 haben. Der Durchmesser des Kernschattens nimmt mit der Entfernung vom leuchtenden Körper ab, der Durchmesser des Halbschattens aber nimmt zu.

Ganz nahe beim schattengebenden Körper ist deshalb der Kernschatten nur von einem schmalen Halbschatten umgeben; nahe hinter dem Körper, welcher den Schatten wirft, ist er deshalb ziemlich scharf begränzt; in größerer Entfernung ist die Breite des Halbschattens bedeutender, der Uebergang vom Kernschatten zum vollen Lichte deshalb allmäliger, der Schatten erscheint nicht mehr scharf, sondern verwaschen. Jenseits des Punktes *s* hört der Kernschatten ganz auf, und der an Breite immer zunehmende Halbschatten wird deshalb auch immer unbestimmter und schwächer.

Fig. 248.



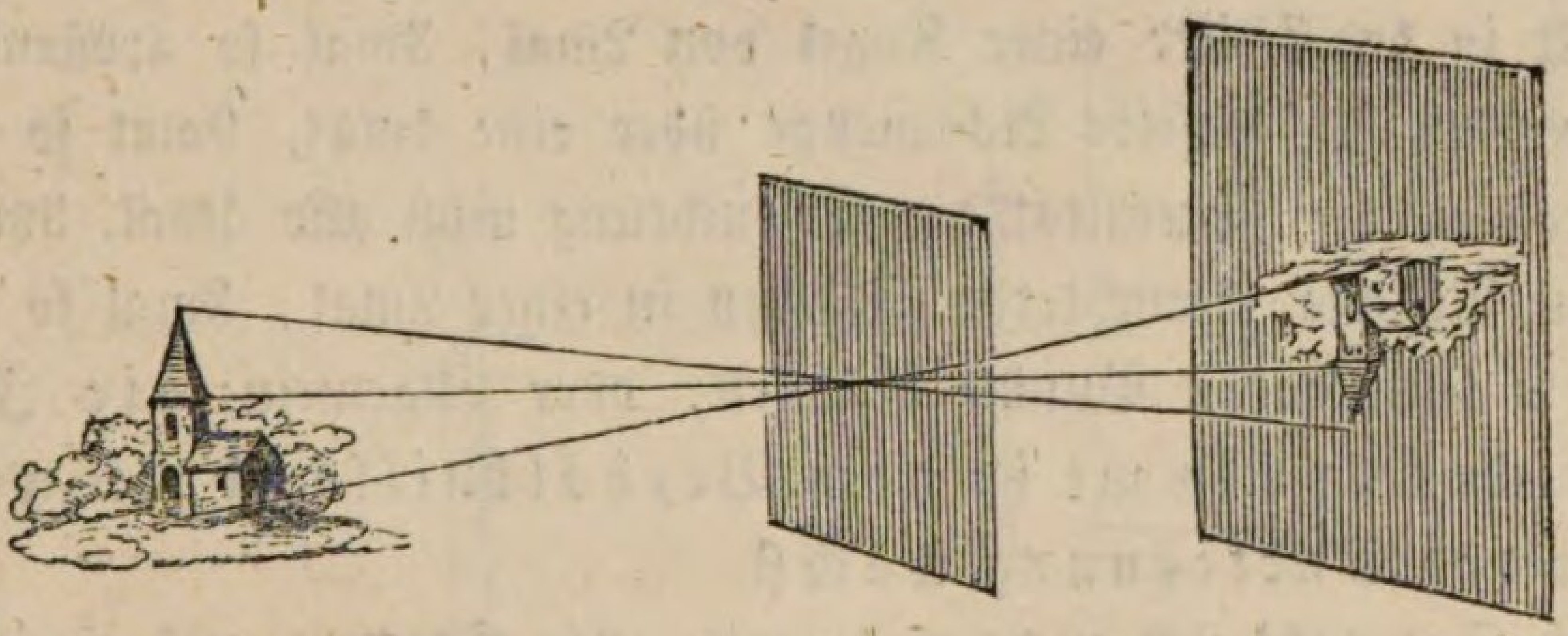
Auf diese Weise erklärt sich, daß der Schatten eines dem Sonnenlichte

ausgesetzten Körpers, dicht hinter demselben aufgefangen, scharf begränzt, in größerer Entfernung hingegen ganz unbestimmt ist. So kann man z. B. nicht mehr mit Bestimmtheit den Punkt angeben, wo der Schatten der Spitze eines Thurmes auf dem Boden aufhört. Ein Haar, welches im Sonnenlichte dicht über ein Blatt Papier gehalten wird, wirft einen scharfen Schatten, hält man es aber nur zwei Zoll hoch über dem Papier, so ist wohl kaum noch ein Schatten wahrzunehmen.

Wenn man das von einem leuchtenden Punkte ausgehende Licht durch einen Schirm auffängt, in welchen eine ganz kleine Oeffnung gemacht ist, so wird das durch die Oeffnung durchgehende Licht einen scharf begränzten Lichtstrahl bilden; läßt man diesen Strahl auf einen zweiten Schirm fallen, so erhält man einen hellen Fleck auf dunklem Grunde. Auf diese Weise erhält man in einem ganz dunklen Zimmer auf einer Wand, welche der feinen Oeffnung im Laden gegenübersteht, ein Bild von jedem außerhalb befindlichen leuchtenden Punkte, welcher Lichtstrahlen durch diese Oeffnung ins Zimmer sendet, und so entstehen auf der Wand verkehrte Bilder aller außerhalb befindlichen Gegenstände, Fig. 249.

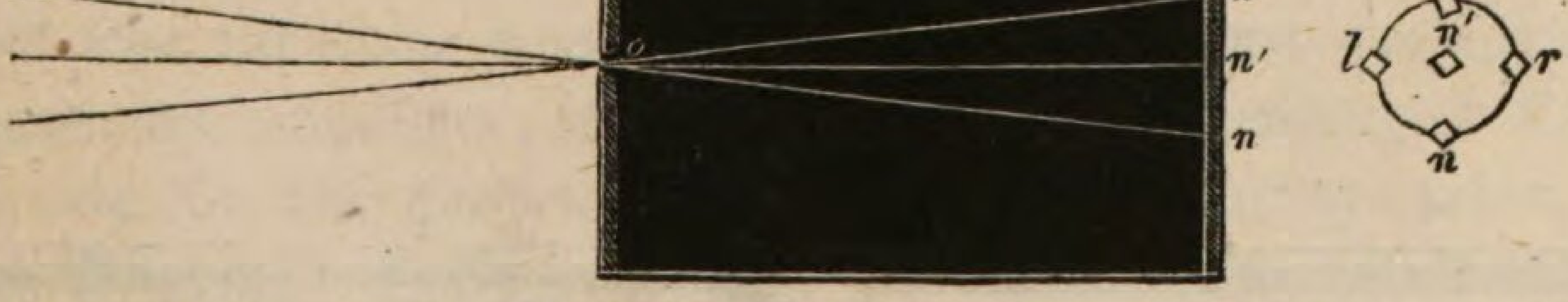
Wenn man das Licht der Sonne durch eine kleine Oeffnung fallen läßt,

Fig. 249.



so erhält man jederzeit ein rundes Sonnenbild, welches auch die Gestalt der Oeffnung selbst seyn mag. Diese anfangs auffallend erscheinende Thatsache erklärt sich ganz einfach. Wenn die Sonne ein einziger leuchtender Punkt wäre, so würde auf der Wand, welche der Oeffnung gegenüberliegt, ein heller Fleck sich bilden, welcher genau die Gestalt der Oeffnung hat. Nehmen wir an, die Oeffnung *o*, Fig. 250, sey viereckig; so wird das vom höchsten Punkte der

Fig. 250.



Sonnenscheibe ausgehende Licht in der Richtung *son* auf den Schirm fallen, und bei *n* wird ein kleiner viereckiger heller Fleck entstehen. Der tiefste Punkt der Sonne veranlaßt ein viereckiges Bild bei *n''*; der mittlere Punkt der Sonnenscheibe aber den eckigen Flecken *n'*. Das Bildchen *l* rührt von dem äußersten Punkte am rechten, *r* aber von dem äußersten Punkte am linken Sonnenrande her. Alle übrigen Punkte des Sonnenrandes geben viereckige Bilder, die auf den Umfang des Kreises *ln''rn* fallen, während die übrigen Punkte der Sonne das Innere dieses Kreises erleuchten; die Gesammtheit aller der einzelnen viereckigen hellen Bildchen zusammengenommen bildet mithin einen kreisförmigen hellen Fleck.

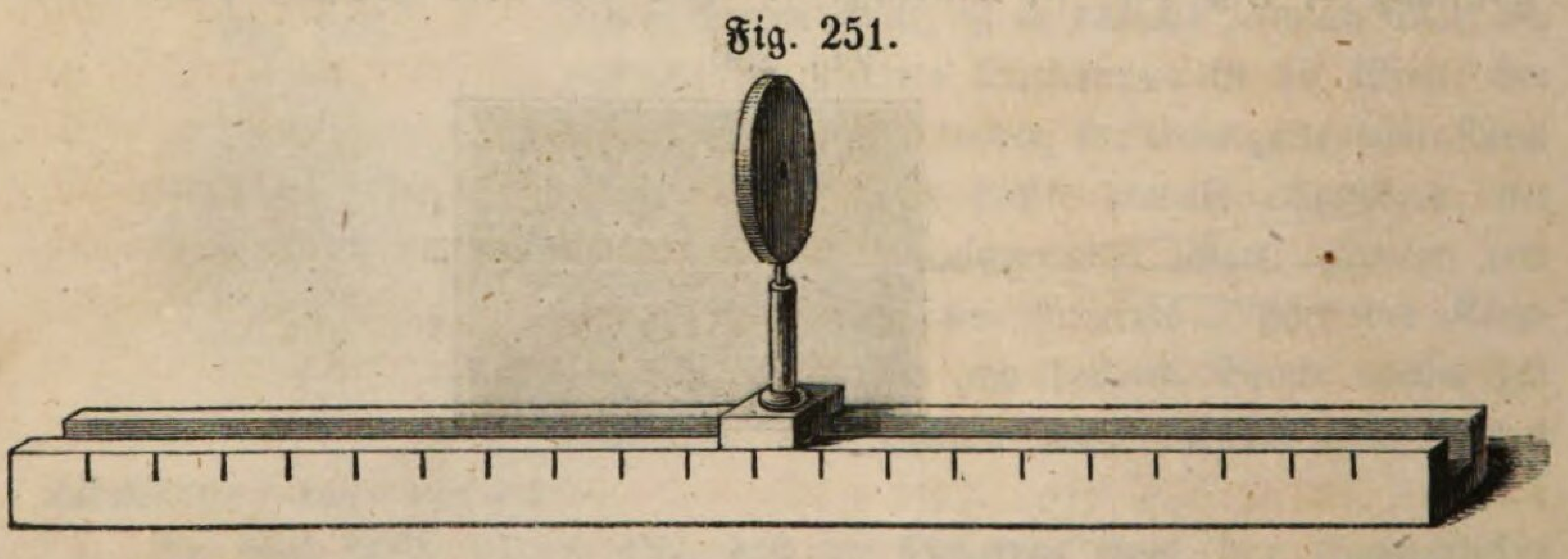
109 **Die Intensität des Lichts nimmt im umgekehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung ab.** Denken wir uns einen leuchtenden Punkt in der Mitte einer Hohlkugel, so wird die Oberfläche derselben alles von dem Punkte ausgehende Licht auffangen. Befände sich derselbe leuchtende Punkt in der Mitte einer Hohlkugel von einem 2mal, 3mal so großen Halbmesser, so würden auch die Oberflächen dieser größeren Kugeln alles von dem leuchtenden Punkte ausgehende Licht auffangen. Nun aber lehrt uns die Geometrie, daß die Oberflächen der Kugeln sich verhalten wie die Quadrate ihrer Halbmesser; wenn sich die Halbmesser der Kugeln verhalten wie 1 : 2 : 3, so verhalten sich ihre Oberflächen wie 1 : 4 : 9. Wenn sich also derselbe leuchtende Punkt in der Mitte einer Kugel von 2mal, 3mal so großem Halbmesser befindet, so muß sich dieselbe Lichtmenge über eine 4mal, 9mal so große Oberfläche verbreiten, die Intensität der Erleuchtung muß also 4mal, 9mal schwächer seyn, wenn sich die erleuchteten Flächen in einer 2mal, 3mal so großen Entfernung vom leuchtenden Punkte befinden, oder allgemein: *die Intensität der Erleuchtung nimmt in dem Verhältnisse ab, in welchem das Quadrat der Entfernung wächst.*

Dieser Satz läßt sich nicht mehr mit aller Strenge auf einen leuchtenden Körper von bedeutender Oberfläche anwenden, dessen Licht man in bedeutenden Entfernungen auffängt.

Mit Hülfe des *Bunsen*'schen Photometers läßt sich das eben erwähnte Gesetz wenigstens annäherungsweise durch den Versuch bestätigen.

Ungefähr in der Mitte einer langen getheilten Rinne befindet sich ein Schieber, der einen Papierschirm trägt, Fig. 251. Das auf einen Rahmen auf-

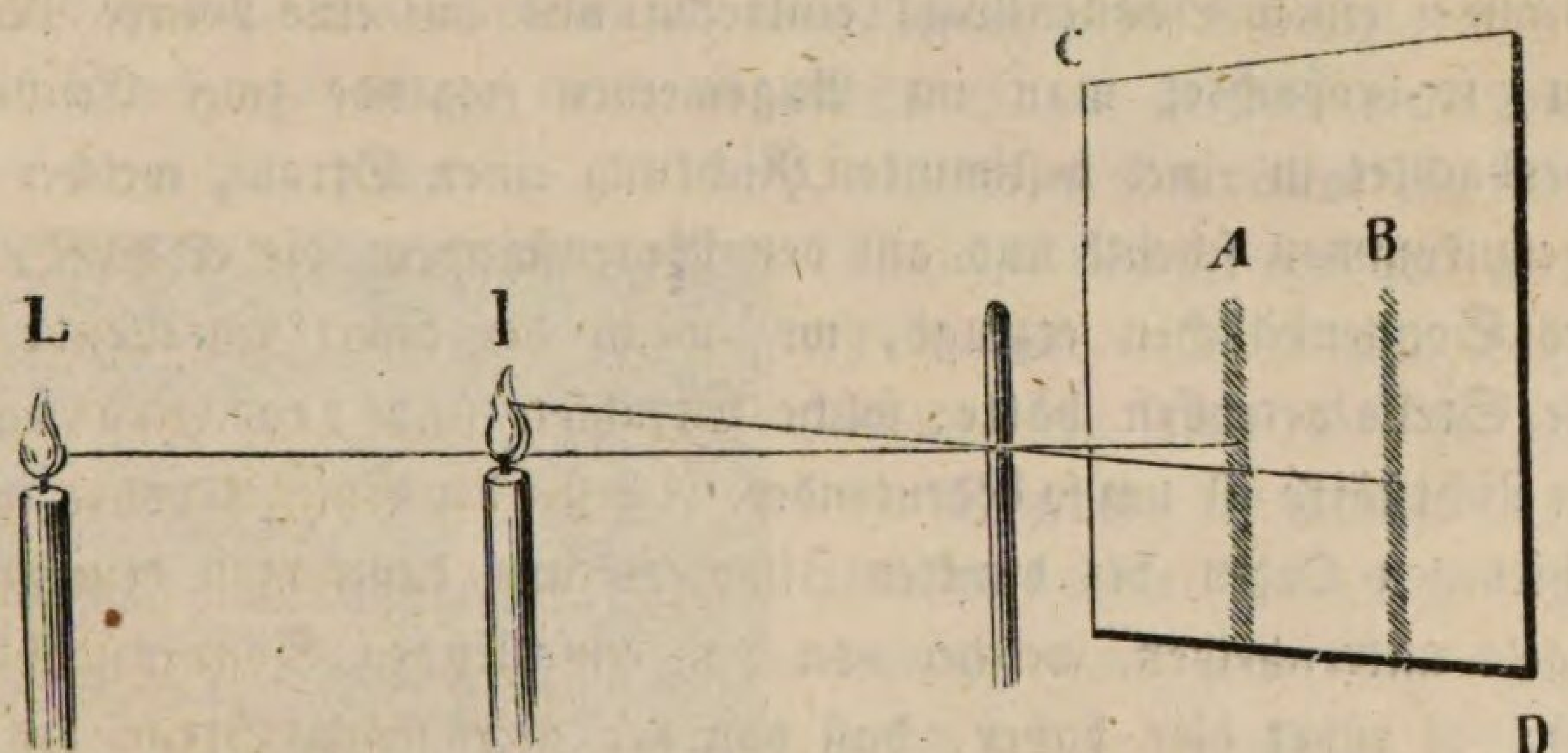
Fig. 251.



gespannte Papier hat in der Mitte einen kleinen mit Stearin oder Wachs gemachten Fleck. Dieser Fleck wird hell auf dunklerem Grunde erscheinen, wenn der Schirm stärker von hinten, dagegen dunkel auf hellerem Grunde, wenn er von vorn stärker erleuchtet ist; wird dagegen der Schirm von vorn und hinten gleich stark erleuchtet, so hört der Fleck auf sichtbar zu seyn. Bringt man nun auf der einen Seite des Schirms eine brennende Kerze in 1 Fuß Entfernung an, so muß man auf der anderen Seite 4 nebeneinander gehaltene Kerzen derselben Art 2 Fuß weit von dem Schirme wegbringen, wenn der Fleck nicht sichtbar seyn soll. Natürlich darf bei diesem Versuch weiter kein fremdes Licht auf den Schirm fallen.

Auf diesen Satz gründet sich die Vergleichung der Lichtstärke verschiedener Lichtquellen. Die zu diesem Zwecke angewandten Apparate nennt man Photometer. Fig. 252 stellt das Wesentliche des Rumford'schen Photometers dar. *CD* ist eine weiße Wand. Nahe vor derselben ist ein undurchsichtiges Stäbchen, etwa so dick wie ein Bleistift, aufgestellt; wenn sich nun ein Licht in *l*, ein anderes in *L* befindet, so werden auf der Wand zwei Schatten des Stäb-

Fig. 252.



chens entstehen. Derjenige Theil der Wand, auf welchem sich kein Schatten befindet, ist von beiden Lichtern beschienen, jeder Schatten ist aber nur durch eine Lichtquelle beleuchtet. Wenn nun beide Lichtquellen vollkommen gleich sind, so werden die beiden Schatten gleich dunkel erscheinen, wenn sich die beiden Lichter in gleicher Entfernung vom Schirm befinden. Wenn aber eine Lichtquelle stärker leuchtet, so wird der eine Schatten heller erscheinen, und um beide wieder gleich zu machen, muß man die stärkere Lichtquelle weiter vom Schirme entfernen. Sind die Schatten gleich, so verhält sich die Lichtstärke der beiden Flammen wie das Quadrat ihrer Entfernung vom Schirme.

Die Einrichtung des Bunsen'schen Photometers ist bereits besprochen worden. Will man mit Hülfe desselben zwei Lichtquellen, etwa eine Lampen- und eine Kerzenflamme vergleichen, so stellt man sie auf entgegengesetzten Seiten des Schirmes, Fig. 251, auf. Bleiben die beiden Lichtquellen unverrückt stehen, so kann man durch Verrücken des Schirmes leicht eine Stellung für denselben ausfindig machen, wo der Fleck gar nicht sichtbar ist. In diesem Fall ist der Schirm gleich stark an beiden Seiten erleuchtet. Die geringste Verrückung nach der

einen oder anderen Seite macht, daß er heller oder dunkler erscheint als der Grund.

Hat man die Stelle ermittelt, für welche der Fleck unsichtbar wird, so verhalten sich die Lichtstärken der beiden Lichtquellen wie die Quadrate ihrer Entfernungen vom Schirme.

Erstes Kapitel.

Reflexion des Lichts.

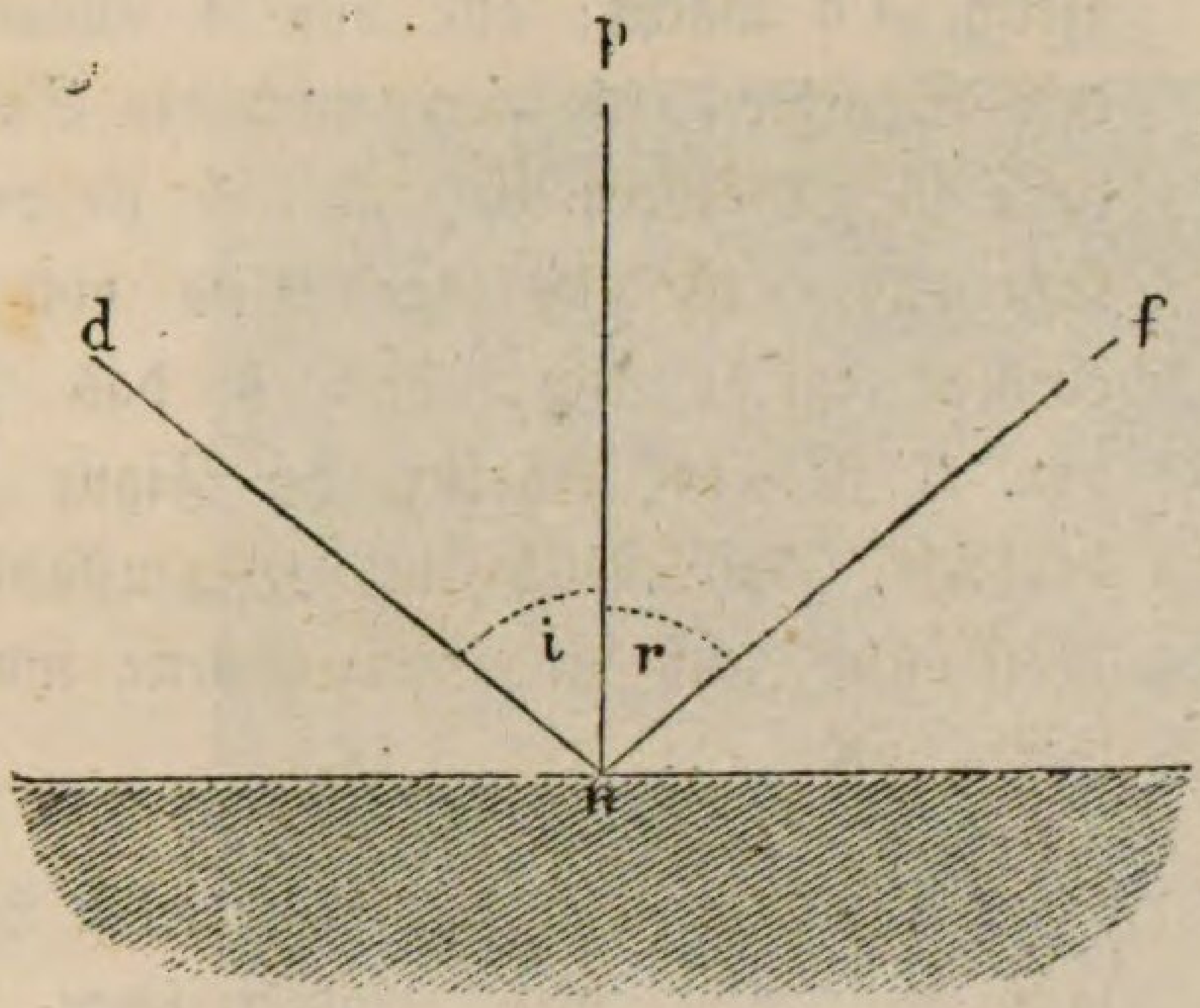
110 **Reflexion des Lichts auf ebenen Flächen.** Wenn man in ein dunkles Zimmer einen Sonnenstrahl eintreten und auf eine polirte Metallfläche fallen läßt, so beobachtet man im Allgemeinen folgende zwei Erscheinungen: 1) man beobachtet in einer bestimmten Richtung einen Strahl, welcher von dem Spiegel herzukommen scheint und auf den Gegenständen, die er trifft, gerade so ein kleines Sonnenbildchen erzeugt, wie wenn der direct einfallende Sonnenstrahl diese Stelle getroffen hätte; solche Strahlen sind regelmäßig reflectirt, ihre Lichtstärke ist um so bedeutender, je besser der Spiegel polirt ist; 2) von den verschiedenen Orten des dunklen Zimmers aus kann man denjenigen Theil des Spiegels unterscheiden, welcher von dem einfallenden Sonnenstrahl getroffen worden ist; es rührt dies daher, daß von der getroffenen Stelle des Spiegels ein Theil des einfallenden Lichts unregelmäßig reflectirt, d. h. nach allen Seiten hin zerstreut wird. Die Intensität des zerstreuten Lichts ist um so größer, je unvollkommener der Spiegel polirt ist.

Wenn es absolut glatte spiegelnde Oberflächen gäbe, so würden wir sie durch unsere Augen gar nicht wahrnehmen können, denn die Körper sind in der Ferne nur durch die an ihrer Oberfläche zerstreuten Strahlen wahrnehmbar. Die regelmäßig reflectirten Strahlen zeigen uns das Bild des leuchtenden Punktes, von dem sie ausgingen, keineswegs aber die Gestalt des reflectirenden Körpers. Bei einem sehr guten Spiegel bemerken wir kaum die spiegelnde Ebene, welche sich zwischen uns und den Bildern befindet, die er uns zeigt.

Wir wollen nun die Richtung der regelmäßig reflectirten Strahlen näher bestimmen. In Fig. 253 sey *fn* die Richtung des einfallenden Strahls und *np* ein auf der Ebene des Spiegels errichtetes Perpendikel, das Einfallsloth, so wird der Strahl in einer solchen Richtung *nd* gespiegelt, daß der Reflexionswinkel

i dem Einfallswinkel r gleich ist, der Strahl macht also vor und nach der Spiegelung denselben Winkel mit dem Einfallslothe; ferner aber liegt der einfallende Strahl, das Einfallsloth, und der reflectirte Strahl in einer und derselben Ebene.

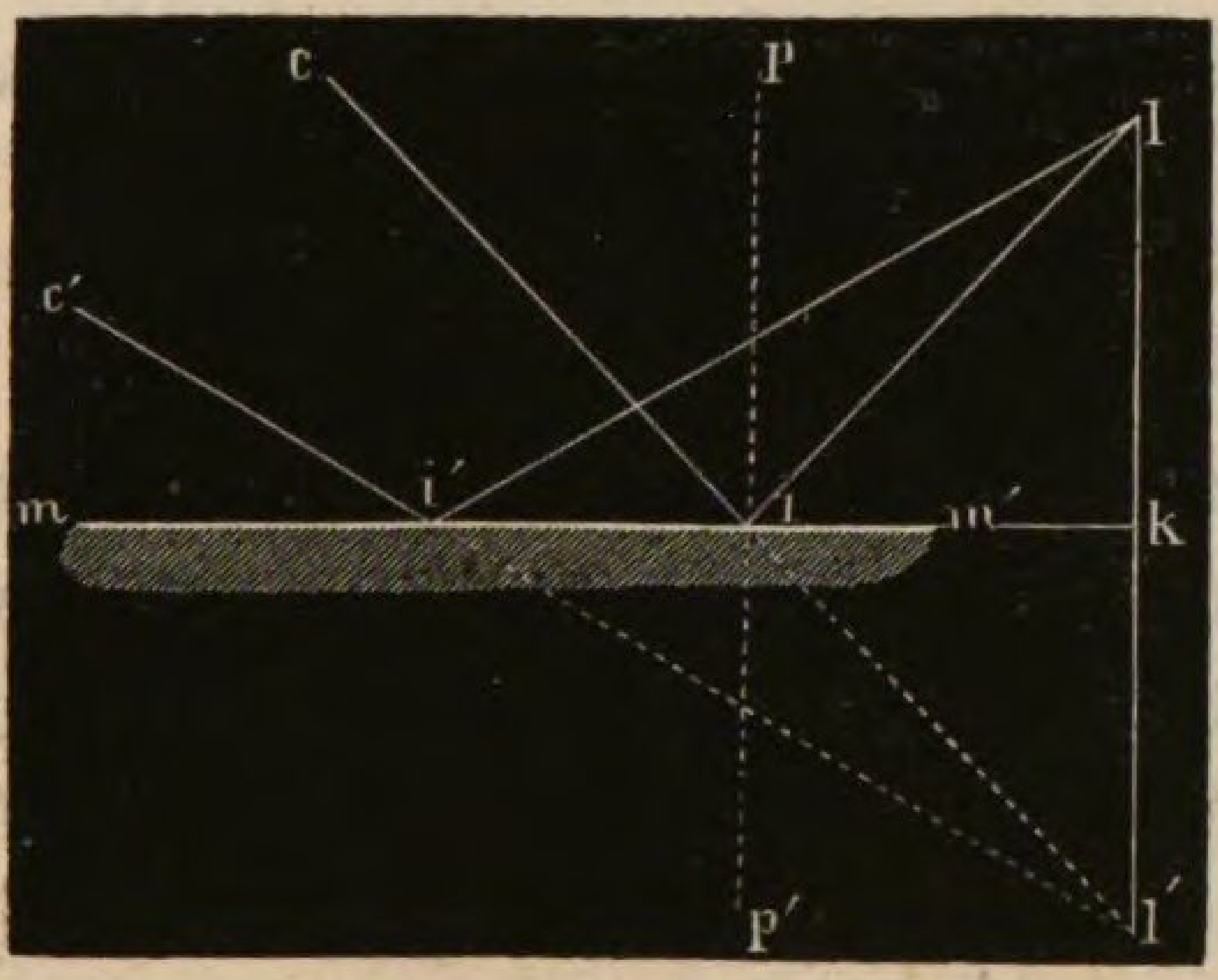
Fig. 253.



Mit Hülfe dieser Grundsätze kann man leicht zeigen, daß ein ebener Spiegel von Gegenständen, die sich vor seiner Ebene befinden, Bilder zeigen muß und daß Bild und Gegenstand in Beziehung auf die spiegelnde Ebene symmetrisch sind.

Es sey $m'm$, Fig. 254, ein ebener Spiegel, l ein leuchtender Punkt vor demselben, der einen Strahl li auf den Spiegel sendet. Dieser Strahl wird nun nach den bekannten Gesetzen in der Richtung ic reflectirt, und wenn der gespiegelte Strahl das Auge trifft, so macht er auf dasselbe denselben Eindruck, als ob er von einem Punkte hinter dem Spiegel käme, der auf der Verlängerung von ci liegt und dessen Entfernung vom Auge eben so groß ist als der Weg, den der Strahl wirklich durchlaufen mußte, um von l nach i und von da nach dem Auge zu gelangen; man findet also diesen Punkt l', wenn man auf der Verlängerung von ci die Entfernung il' gleich il macht. Verbindet man l und l' durch eine gerade Linie, so kann man leicht beweisen, daß die Dreiecke lik und $l'ik$ einander gleich sind, und daraus ergiebt sich dann ferner, daß ll' rechtwinklig auf mm' steht und daß $lk = l'k$ sey. Um also das Bild eines leuchtenden Punktes in einem ebenen Spiegel zu finden, hat man nur von dem leuchtenden Punkte ein Perpendikel auf den Spiegel oder seine Verlängerung zu fällen und dasselbe hinter der Spiegelebene um eben so viel zu verlängern, als der leuchtende Punkt vor dem Spiegel liegt.

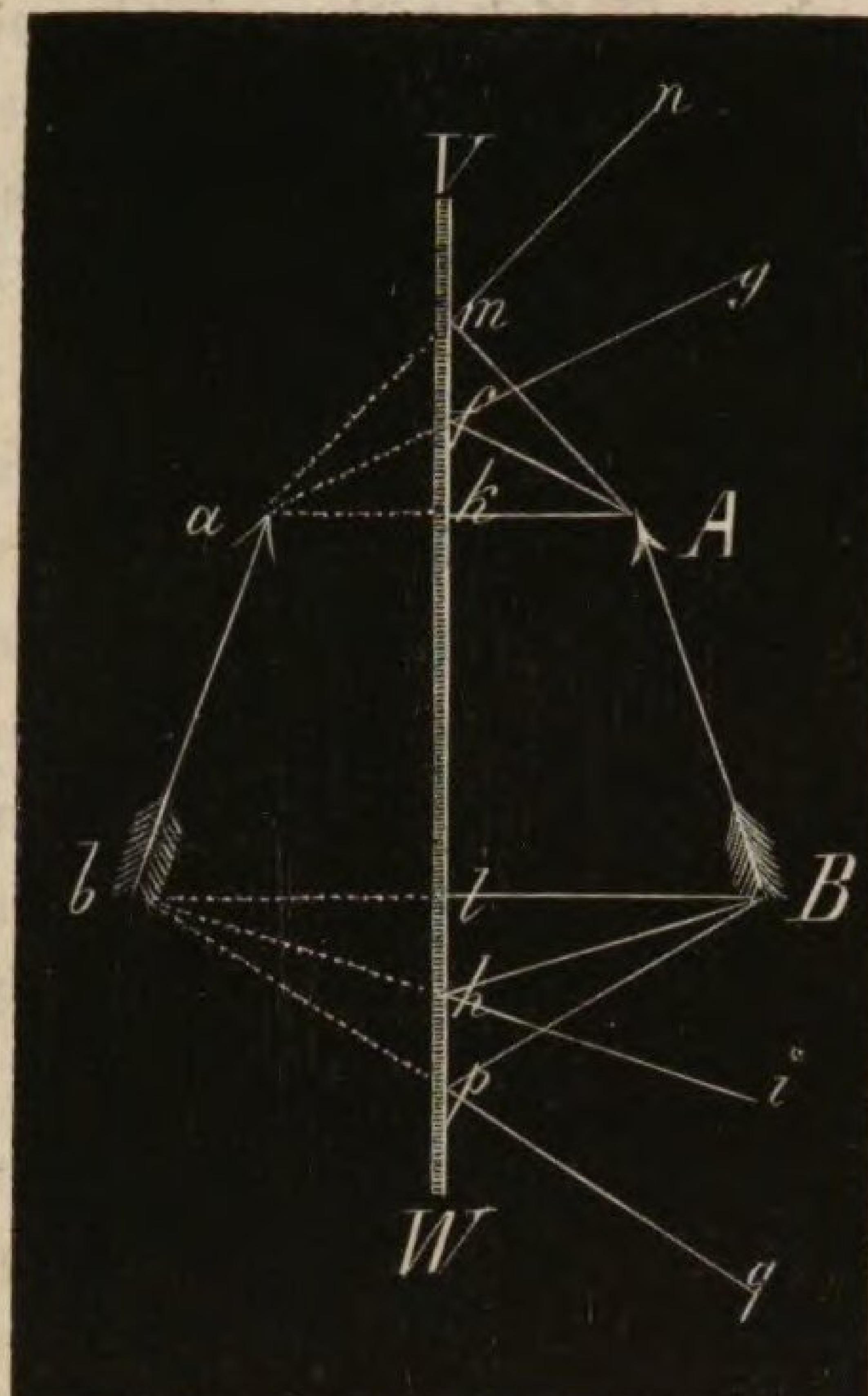
Fig. 254.



Da dies nun für jeden Punkt eines Körpers gilt, welcher Licht aussendet, mag es nun sein eigenes oder zerstreutes Licht seyn, so kann man auch leicht das Bild eines Gegenstandes construiren. In Fig. 255 (f. S.) sey VW ein ebener Spiegel, AB ein Pfeil, welcher sich vor demselben befindet. Man findet das

Bild der Spitze, wenn man von *A* ein Perpendikel *Ak* auf die Spiegelebene fällt und die Verlängerung *ak* desselben gleich *Ak* macht; alle von *A* ausgehenden Strahlen scheinen nach der Spiegelung so zu divergiren, als ob sie von *a* kämen, *a* ist also das Bild von *A*; ebenso ergiebt sich, daß *b* das Bild von *B* ist; der Anblick der Figur zeigt deutlich, daß Bild und Gegenstand in Beziehung auf die Spiegelebene symmetrisch sind.

Fig. 255.



Die Richtung des reflectirten Lichts läßt sich also mit geometrischer Genauigkeit bestimmen, bei der Intensität der reflectirten Strahlen ist dies aber nicht der Fall. Im Allgemeinen gilt hier Folgendes:

1) Die Intensität des regelmäßig reflectirten Lichts wächst mit dem Einfallswinkel, ohne jedoch bei rechtwinkligem Auffallen Null zu seyn.

2) Sie hängt von dem Mittel ab, in welchem sich das Licht bewegt und auf welches es trifft.

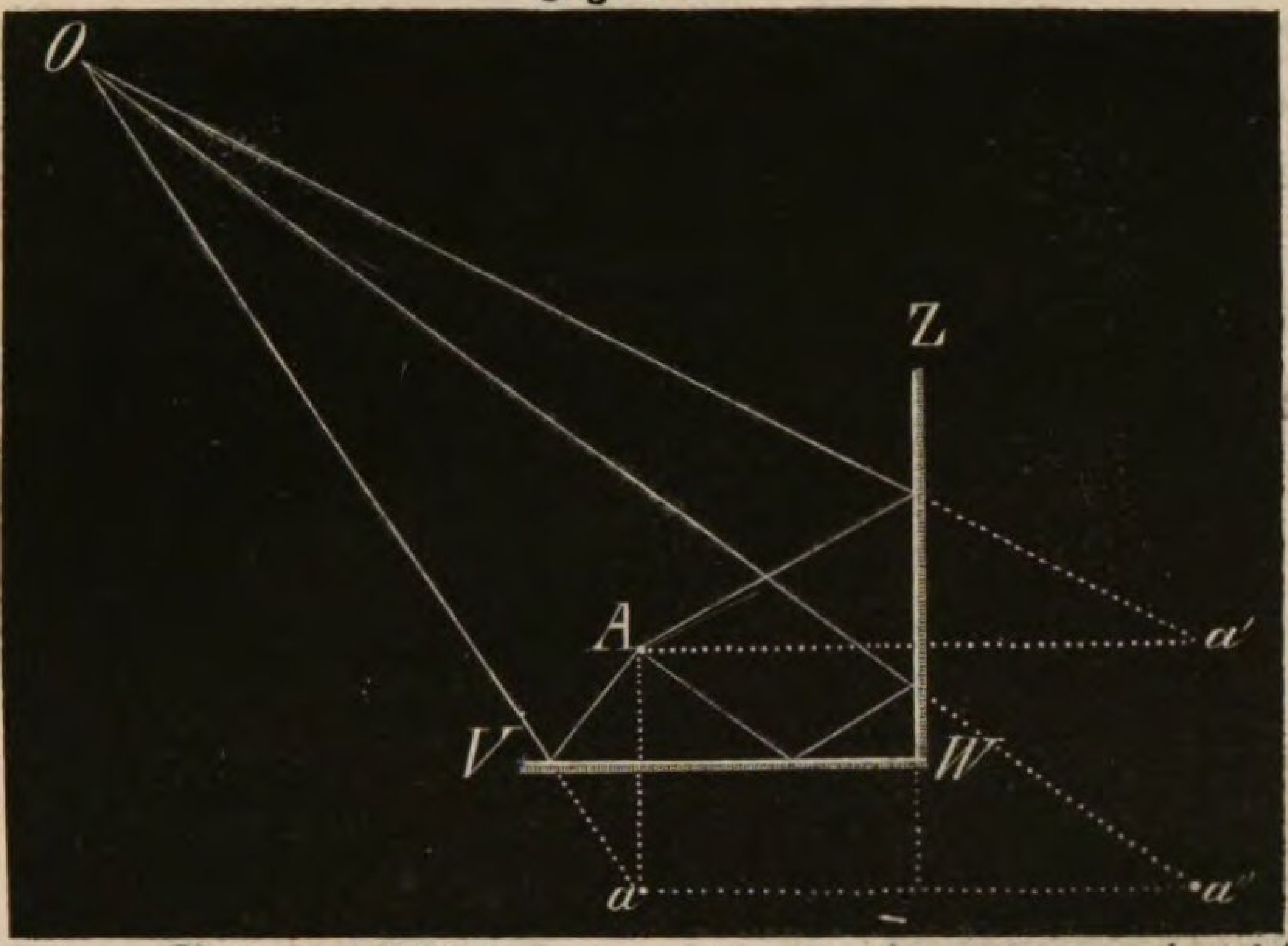
Wir wollen nur einige Beispiele anführen, um dies verständlicher zu machen.

Wenn die von einer Kerzenflamme ausgehenden Strahlen nahe rechtwinklig auf eine zart mattgeschliffene Glasflächefallen, so kann man kein Bild der Flamme unterscheiden, man sieht es aber sehr gut, wenn die Strahlen recht schief auf die Platte auffallen; in diesem Falle kann man das Bild auch auf polirtem Holze, glänzendem farbigen Papier u. s. w. wahrnehmen; es geht daraus hervor, daß die Menge des reflectirten Lichts um so größer ist, je schiefer die Strahlen einfallen.

111 **Winkelspiegel.** Wenn zwei Spiegel in irgend einem Winkel zusammengestellt werden, so sieht man von einem zwischen ihnen sich befindlichen Gegenstande mehrere Bilder, deren Zahl von der Neigung der Spiegel abhängt. In Fig. 256 seyen *V W* und *Z W* zwei unter einem rechten Winkel zusammenstoßende ebene Spiegel, *A* ein leuchtender Punkt, der sich innerhalb des von ihnen gebildeten Winkels befindet. Zunächst wird man in jedem Spiegel ein Bild von *A* sehen, und zwar ist das Bild für den einen Spiegel in *a*, für den anderen in *a'*; ein in *O* befindliches Auge sieht also außer dem Gegenstande *A* selbst in Folge einer einmaligen Spiegelung auch noch die Bilder *a* und *a'* desselben. Nun aber können solche Strahlen, die von dem einen Spiegel reflectirt worden sind, den zweiten treffen und an demselben eine abermalige Re-

flexion erleiden. Da alle vom ersten Spiegel reflectirten Strahlen so divergiren, als ob sie von *a* kämen, so ist *a* gewissermaßen selbst ein Gegenstand, welcher

Fig. 256.

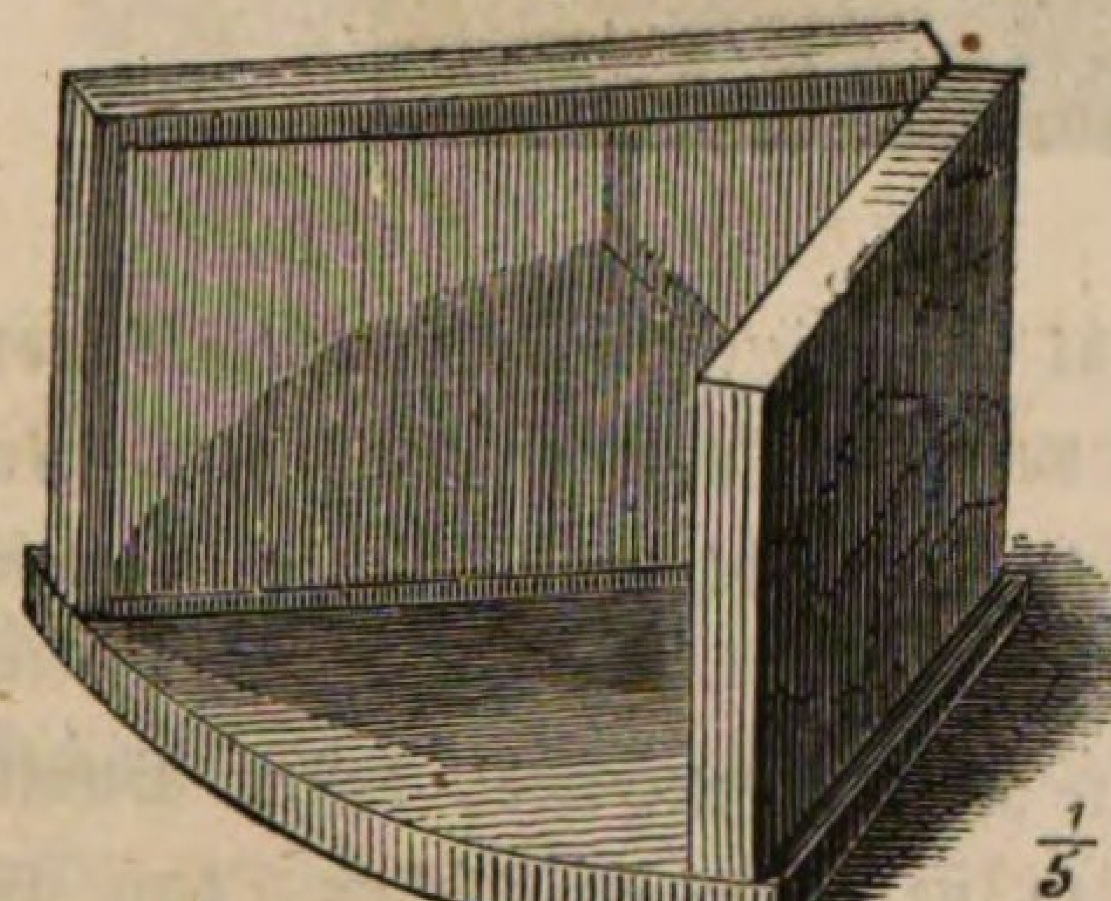


Strahlen auf den Spiegel *Z W* sendet, und man kann demnach leicht das Bild des Bildes *a* im Spiegel *Z W* finden; man fälle nur von *a* ein Perpendikel auf die Verlängerung von *Z W* und verlängere es auf die bekannte Weise, so erhält man das Bild *a''*, von welchem alle Strahlen auszugehen scheinen, die von dem Spiegel *V W* auf den Spiegel *Z W* reflectirt werden und an diesem eine abermalige Spiegelung erleiden; und so sieht das Auge in *O* nach zweimaliger Spiegelung noch ein Bild in *a''*.

Das Bild *a'* ist aber auch ein Gegenstand für den Spiegel *V W*, und wenn man den Ort des Bildes von *a'* bestimmt, so findet man, daß er ebenfalls *a''* ist, d. h. alle von *Z W* auf den Spiegel *V W* geworfenen Strahlen divergiren nach der zweiten Spiegelung so, als ob sie von *a''* kämen.

Die zum zweiten Mal reflectirten Strahlen treffen keinen der beiden Spiegel mehr, oder mit anderen Worten: Von dem Bilde *a''* ist kein weiteres Bild mehr sichtbar, außer dem Gegenstande *A* sieht man also in unserem Falle noch drei Bilder desselben.

Fig. 257.



Wären die Spiegel unter einem Winkel von 60°, 45°, 36° u. s. w. geneigt gewesen, d. h. betrüge der Winkel, den sie machen, $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{10}$ des ganzen Umfanges, so würde man, den Gegenstand selbst mitgerechnet, 6, 8, 10 u. s. w. Bilder sehen.

Fig. 257 zeigt Winkelspiegel, welche, wie es gewöhnlich der Fall ist, einen Winkel von 60° mit einander machen. Das **Kaleidoskop** ist eine Anwendung der Winkelspiegel.

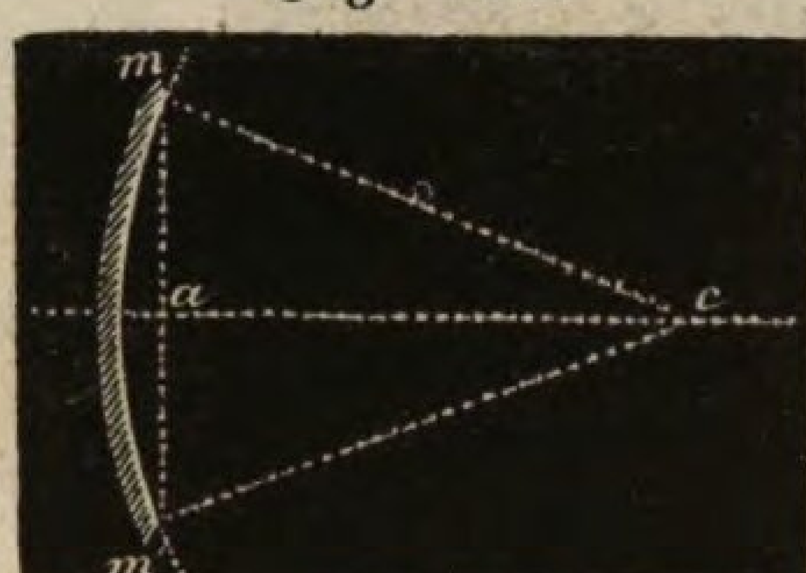
Wie man sieht, vermehrt sich die Anzahl der Bilder, wenn der Winkel kleiner wird; ihre Anzahl wird unendlich groß, wenn der Winkel der Spiegel Null ist, d. h. wenn die Spiegel einander parallel sind.

112 **Reflexion auf gekrümmten Spiegeln.** Wenn ein Lichtstrahl eine krumme Oberfläche in irgend einem Punkte trifft, so wird er gerade so reflectirt, als ob er die Berührungsebene dieses Punktes getroffen hätte.

Man denke sich eine Hohlkugel, deren innere Fläche gut polirt ist, so ist ein von dieser Hohlkugel durch eine Ebene abgeschnittenes Stück ein sphärischer Hohlspiegel. Ein convexer Kugelspiegel hingegen ist ein Stück einer außen polirten Kugel.

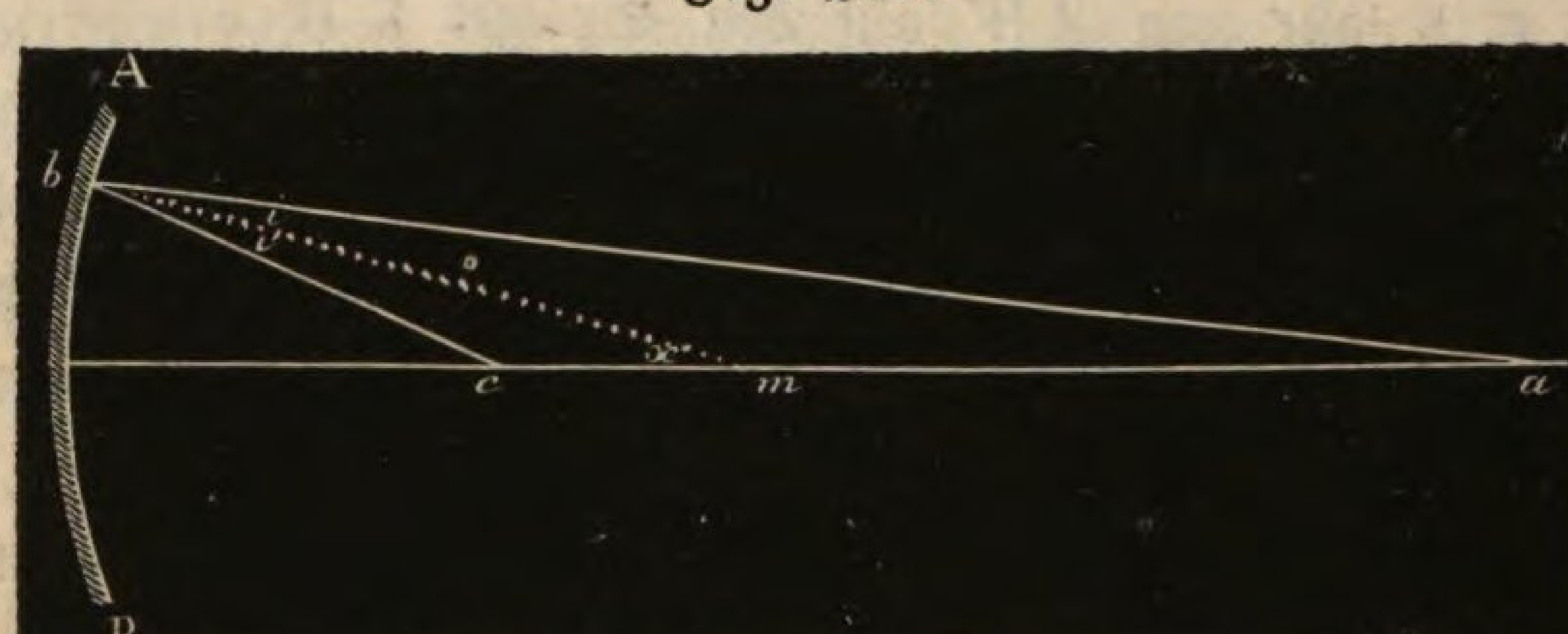
Der Durchmesser eines Kugelspiegels ist die Linie *m m'*, Fig. 258, welche zwei entgegengesetzte Punkte des Randes verbindet; die Linie *c a*, welche den Mittelpunkt der Kugel mit der Mitte des Spiegels verbindet, heißt seine Axe; der Winkel endlich, welchen die Linien *c m* und *c m'* mit einander machen, seine Oeffnung. Der Mittelpunkt *c* der Kugel, von welcher der Spiegel ein Stück ist, wird auch Mittelpunkt der Krümmung genannt.

Fig. 258.



113 **Von den sphärischen Hohlspiegeln.** Es sey *A B*, Fig. 259, der Durchschnitt eines sphärischen Hohlspiegels, dessen Mittelpunkt *m* ist. In *a* sey ein leuchtender Punkt, der seine Strahlen auf den Spiegel sendet. Zieht man vom leuchtenden Punkte *a* eine gerade Linie *a m d* durch den Mittelpunkt der Kugel bis zum Spiegel, so ist diese Linie die Axe des Strahlenkegels, welcher

Fig. 259.



vom Spiegel reflectirt wird. Wie ein Strahl *a b* dieses Strahlenkegels vom Spiegel reflectirt wird, ist leicht zu finden, denn die von *b* nach dem Mittelpunkte *m* gezogene Gerade ist das Einfallsloth. Macht man Winkel *i* gleich Winkel *i'*, so ist *b c* der reflectirte Strahl.

Denkt man sich auf dem Spiegel einen Kreis bezeichnet, dessen Punkte sämmtlich von *d* so weit entfernt sind als *b*, so ist leicht einzusehen, daß alle Strahlen, welche, von *a* ausgehend, den Spiegel in einem Punkte dieses Ringes treffen, so reflectirt werden, daß sie die Axe *a d* in demselben Punkte *c* schneiden.

Wenn der leuchtende Punkt sehr weit vom Spiegel entfernt ist, so kann man alle Strahlen, welche er auf den Spiegel sendet, als unter sich parallel betrachten. Bestimmen wir die Lage des Punktes *c* für diesen Fall. In Fig. 260 sey *ab* ein parallel mit der Axe einfallender Lichtstrahl, *bm* das Einfallsloth, so ist offenbar $i = x$. Wenn nun die Winkel *i* und *x* sehr klein sind, so ist das Dreieck *bcm* so flach, daß die Summe der Seiten *bc* und *cm* nicht merklich größer ist, als der Radius *bm*, und da $bc = cm$, so ist *cm* sehr nahe gleich $\frac{1}{2}$ *bm*, d. h. sehr nahe gleich dem halben Radius; man kann also ohne merklichen Fehler annehmen, daß alle parallel mit der Axe einfallenden Strahlen, welche den Spiegel in solchen Punkten *b* treffen, daß der Bogen *bd* nur einen kleinen Winkel überspannt, in einem Punkte der Axe vereinigt werden, welcher in der Mitte zwischen dem Krümmungsmittelpunkte des Spiegels und dem Spiegel selbst liegt. Solche Strahlen, welche der Axe so nahe liegen, daß der Werth von *mc* für denselben nicht merklich von $\frac{1}{2}$ *bm* differirt, heißen **centrale Strahlen**. Der Vereinigungspunkt der parallel mit der Axe auffallenden centralen Strahlen führt den Namen **Hauptbrennpunkt** oder **Hauptfocus** (er soll in den folgenden Figuren mit *F* bezeichnet werden). **Dieser Hauptfocus liegt, wie wir gesehen haben, in der Mitte zwischen dem Krümmungsmittelpunkte des Spiegels und dem Spiegel selbst, auf der Axe der parallelen Strahlen.**

Fig. 260.

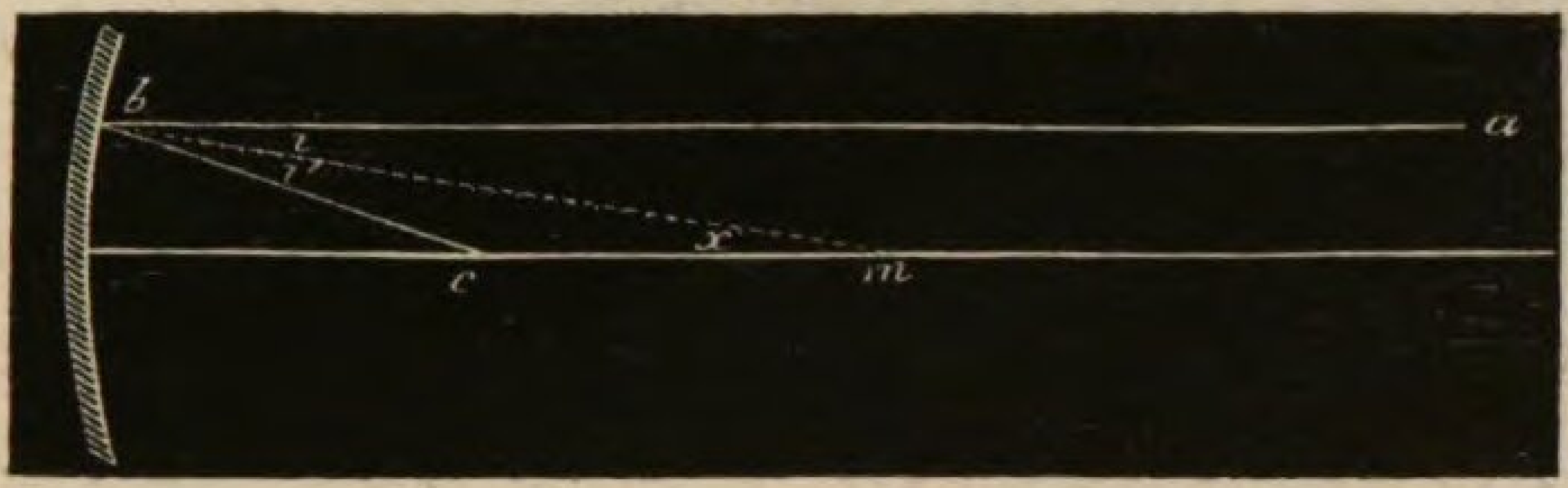


Fig. 261.

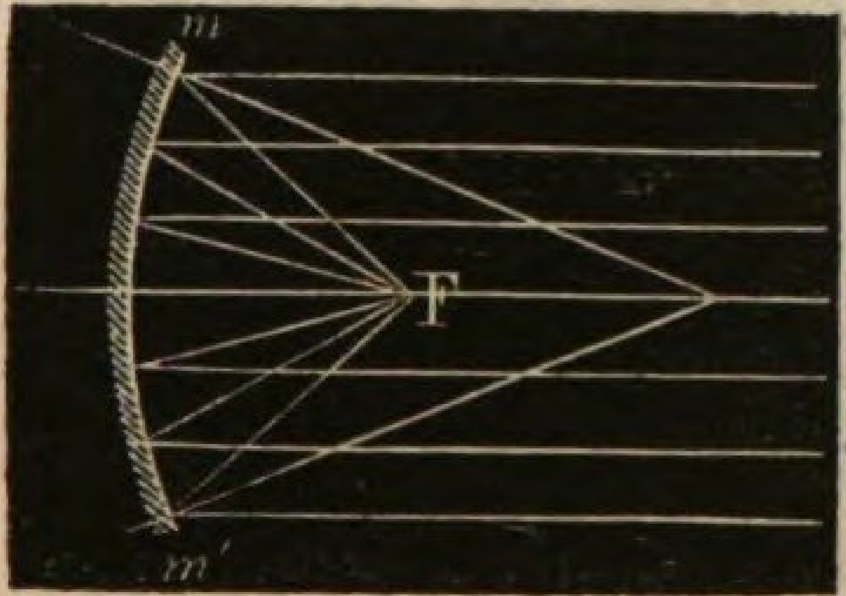
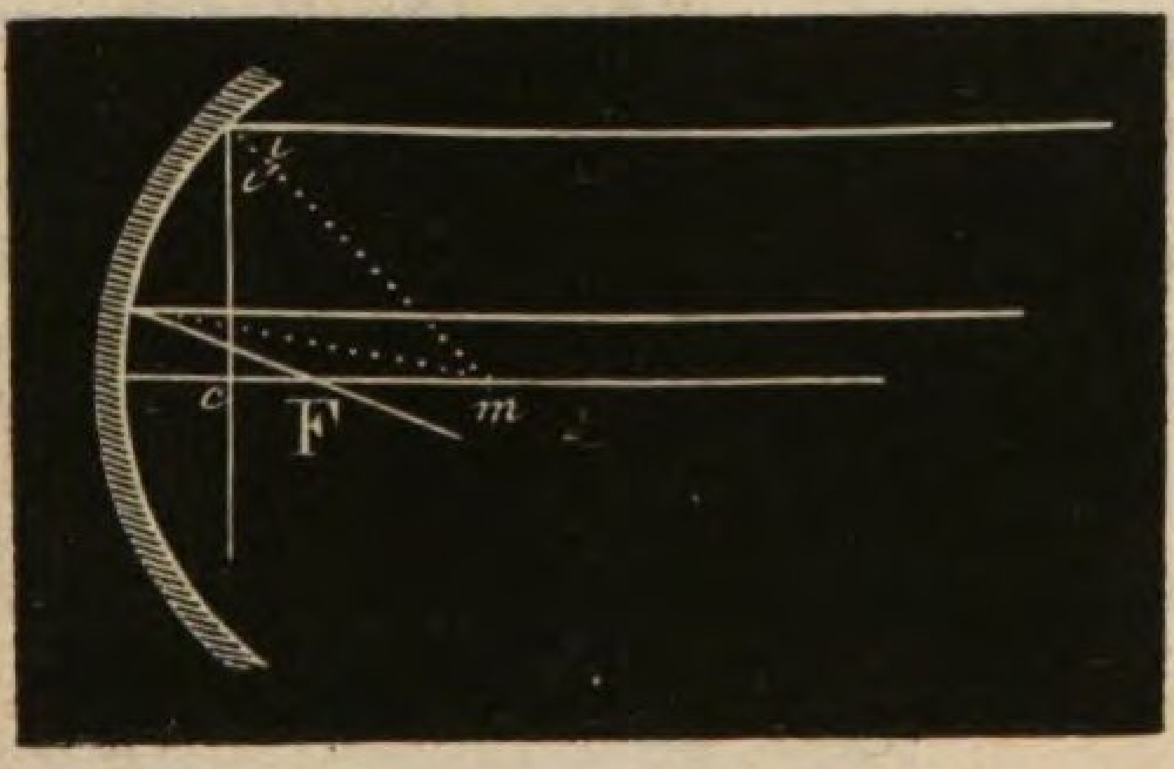


Fig. 262.



Je mehr *i* wächst, d. h. je weiter von der Axe die Strahlen auf den Spiegel fallen, je größer die Krümmung des Spiegels vom Einfallspunkte bis zur Mitte des Spiegels, desto mehr rückt der Punkt *c*, in welchem die reflectirten Strahlen die Axe schneiden, nach dem Spiegel hin. Der Vereinigungspunkt nicht centraler Strahlen liegt also dem Spiegel selbst näher als der Hauptbrennpunkt, wie man auch aus Fig. 262 ersehen kann.

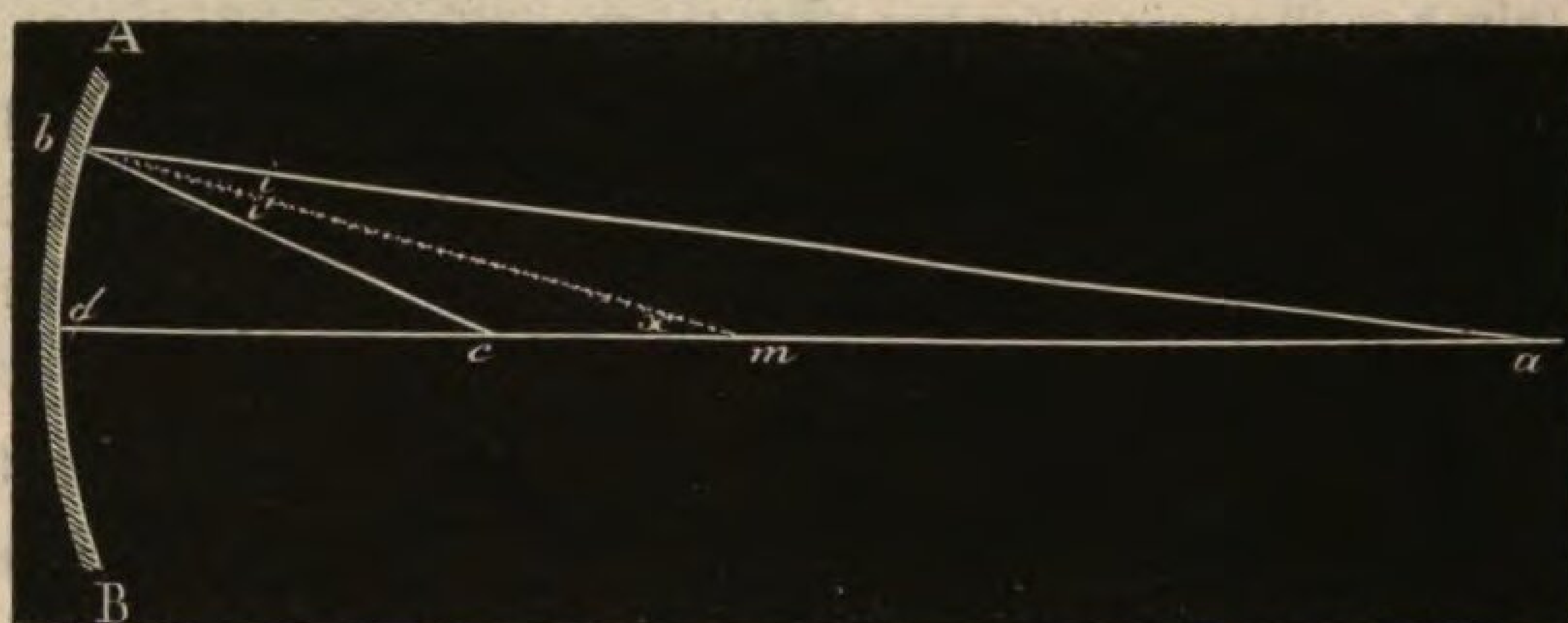
Wenn ein Hohlspiegel zu optischen Zwecken brauchbar seyn soll, so muß er die von einem Punkte ausgehenden Strahlen auch möglichst nahe wieder in

einem Punkte vereinigen. Dies ist aber nur dann möglich, wenn die Oeffnung des Spiegels nicht bedeutend, wenn sie allerhöchstens 5 bis 6⁰ ist, denn nur in diesem Falle kann man alle den Spiegel treffenden Strahlen als centrale Strahlen betrachten Wir wollen im Folgenden auch nur solche Spiegel, also auch nur centrale Strahlen, besprechen.

Der erwähnte Fehler, daß nicht alle mit der Axe parallel einfallenden Strahlen genau in einem Punkte vereinigt werden, wird **sphärische Aberration** genannt.

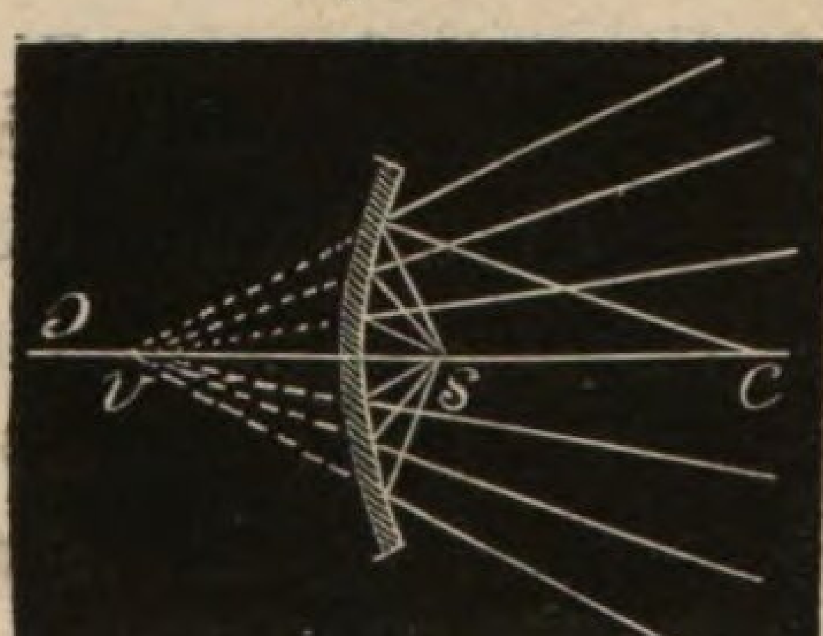
Wenn der leuchtende Punkt nicht unendlich weit liegt, sondern in solcher Entfernung, daß man die Divergenz der den Spiegel treffenden Strahlen nicht mehr vernachlässigen darf, so ändert auch der Brennpunkt seine Stellung, und zwar rückt er vom Spiegel mehr und mehr weg, je mehr sich der leuchtende Punkt nähert. Daß dem so sey, ist aus Fig. 263 leicht zu sehen. Je näher

Fig. 263.



der leuchtende Punkt rückt, desto kleiner wird *i*, desto kleiner wird also auch *i'*, und desto mehr rückt also *c* nach *m* hin. Wenn man also einen leuchtenden Punkt, der so weit vom Spiegel entfernt ist, daß seine Strahlen im Hauptbrennpunkte wieder vereinigt werden, dem Spiegel fortwährend nähert, so wird der Brennpunkt vom Hauptbrennpunkte fortwährend dem Mittelpunkte näher rücken, bis endlich, wenn der leuchtende Punkt im Centrum des Spiegels steht, der Brennpunkt mit dem leuchtenden Punkte zusammenfällt. Rückt der leuchtende Punkt dem Spiegel noch näher, so fällt der Brennpunkt weiter und weiter vom Spiegel, und wenn der leuchtende Punkt den Hauptbrennpunkt einnimmt, so werden seine Strahlen vom Spiegel parallel mit der Axe reflectirt.

Fig. 264.

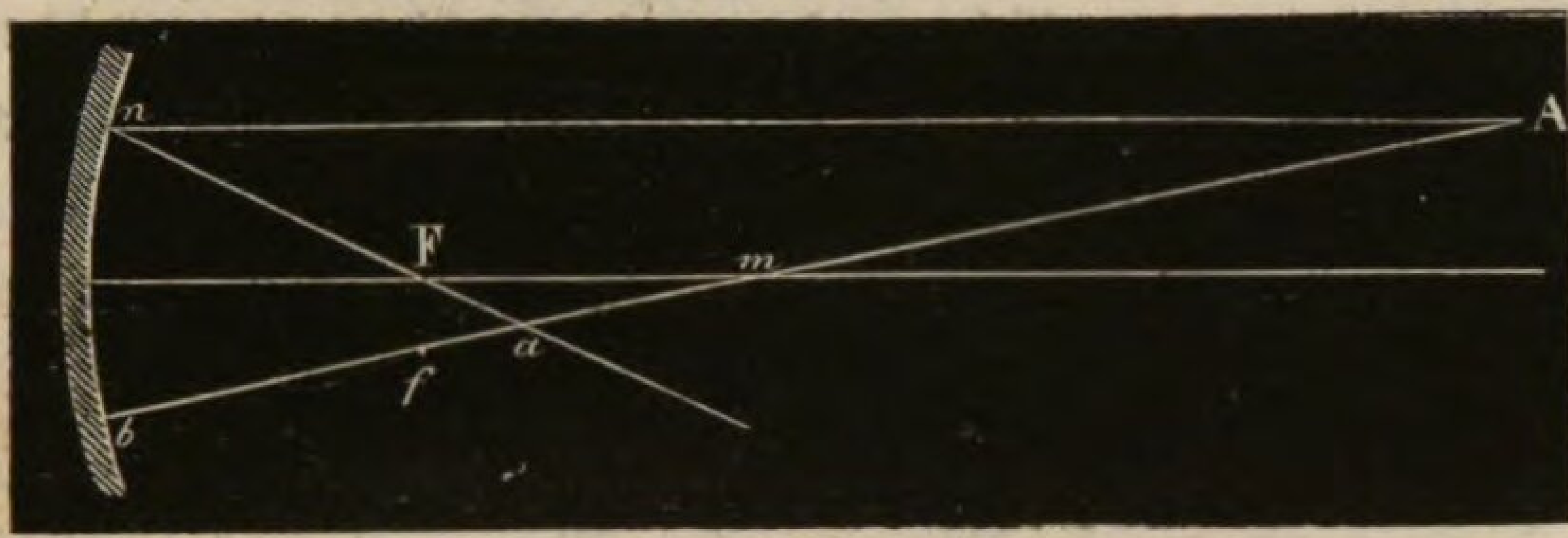


In Fig. 264 ist noch der einzig übrige Fall betrachtet, nämlich daß der leuchtende Punkt *s* zwischen dem Spiegel und dem Hauptbrennpunkte liegt. Hier werden die Strahlen so reflectirt, daß sie nach der Reflexion divergiren, als ob sie von einem Punkte *v* kämen, der hinter dem Spiegel liegt und den man für jeden besonderen Fall durch Construction leicht finden kann.

Wir haben bisher nur solche leuchtende Punkte betrachtet, welche auf der Axe des Spiegels lagen, solche Punkte also, für welche die Axe der auf den

Spiegel gesandten Strahlen mit der Axe des Spiegels zusammenfiel. Alle bisher entwickelten Gesetze gelten aber auch für solche leuchtende Punkte, welche außerhalb der Axe des Spiegels liegen; es sey z. B. in Fig. 265 *A* ein solcher leuchtender Punkt. Zieht man von *A* über *m* eine Linie nach dem Spiegel, so

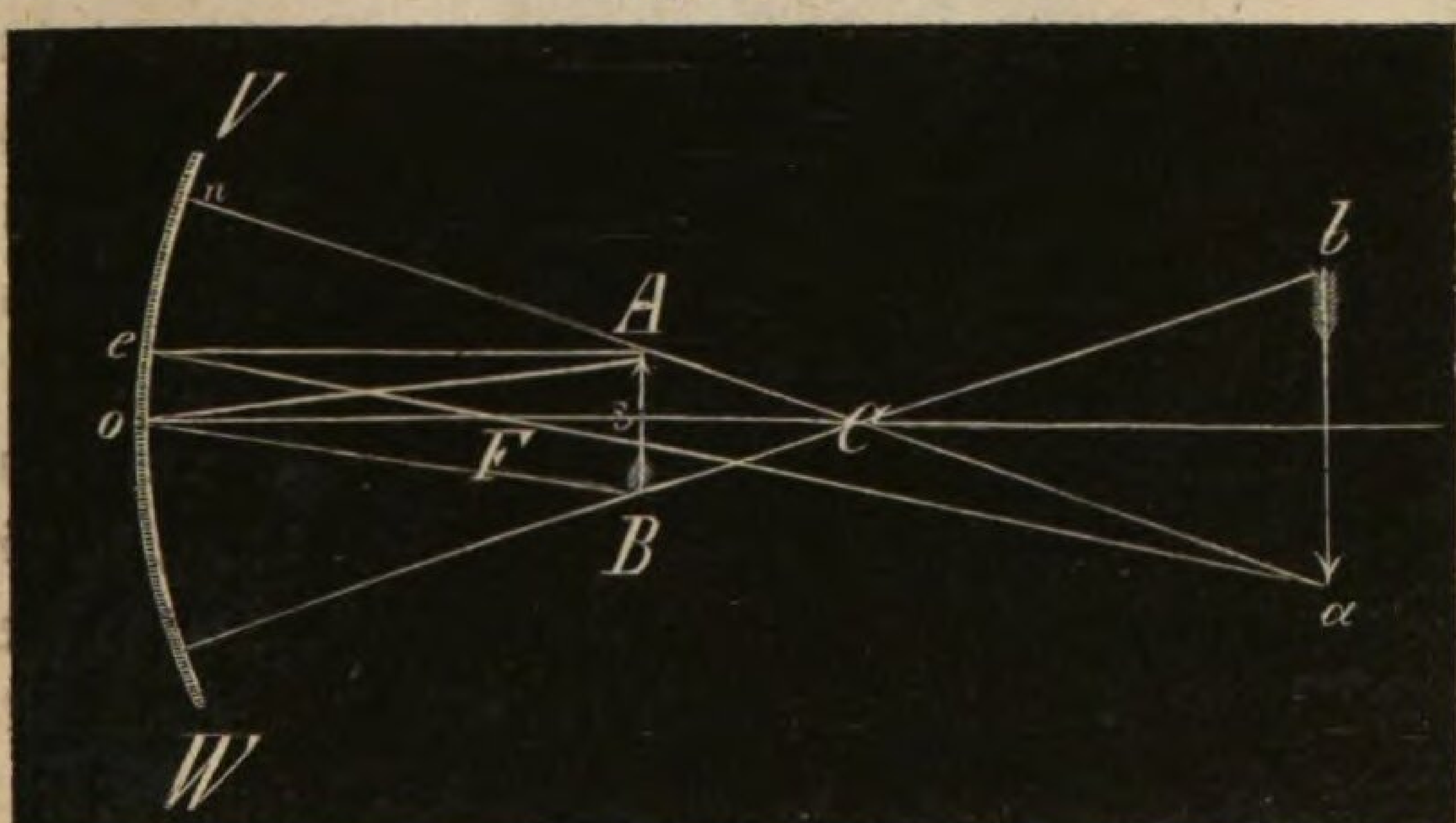
Fig. 265.



ist dies die Axe des von *A* auf den Spiegel gesandten Strahlenkegels, und auf dieser Axe müssen sich alle von *A* ausgehenden Strahlen wieder vereinigen. Wenn ein ganzes Bündel Strahlen mit *Amb* parallel auf den Spiegel fiele, so würden sie sich nach der Reflexion im Punkte *f* vereinigen, der in der Mitte zwischen *m* und *b* liegt; da aber die von *A* ausgehenden Strahlen divergiren, so liegt ihr Vereinigungspunkt weiter vom Spiegel ab als *f*. Man kann nun diesen Vereinigungspunkt leicht durch folgende Construction finden. Man ziehe von *A* eine Linie *An* parallel mit der Axe des Spiegels. Ein Strahl, der in dieser Richtung den Spiegel trifft, wird aber bekanntlich nach dem Hauptbrennpunkte *F* reflectirt; zieht man nun von *n* über *F* eine Linie, so wird diese die Linie *Amb* schneiden, und der Durchschnittspunkt *a* ist offenbar derjenige, in welchem alle von *A* ausgehenden Strahlen nach ihrer Reflexion durch den Spiegel wieder vereinigt werden, kurz *a* ist das Bild von *A*.

Von den durch Hohlspiegel erzeugten Bildern. In Fig. 266 stelle *AB* einen Gegenstand vor, der sich zwischen dem Krümmungsmittelpunkte *C* des Spiegels und dem Hauptbrennpunkte *F* befindet. Nach dem, was oben 114

Fig. 266.



gesagt wurde, ist es leicht, das Bild des Punktes *A* zu finden, denn er liegt auf der durch *C* und *A* gezogenen Linie, da ja ein Strahl *An* in der Richtung *nA*

reflectirt wird. Ein von *A* parallel mit der Hauptaxe auf den Spiegel fallender Strahl *Ae* wird aber nach dem Hauptbrennpunkte *F* reflectirt. Die in den Richtungen *nA* und *eF* reflectirten Strahlen schneiden sich aber in *a*, und hier ist das Bild von *A*. Ebenso findet man das Bild *b* des Punktes *B*, und so ergiebt sich, daß man durch einen Hohlspiegel von einem Gegenstande *AB*, welcher zwischen dem Hauptbrennpunkte und dem Mittelpunkte der Krümmung liegt, ein verkehrtes, vergrößertes Bild jenseits *C* erhält.

Da die von *A* ausgehenden Strahlen in *a* gesammelt werden, so werden auch umgekehrt, wenn *a* ein leuchtender Punkt ist, die von ihm ausgehenden Strahlen durch den Spiegel *A* reflectirt werden; kurz *A* ist in diesem Falle das Bild von *a*; ebenso ist *B* das Bild von *b*. Wenn sich also ein Gegenstand *ab* jenseits des Mittelpunktes *C* befindet, so wird der Hohlspiegel von ihm in ein verkehrtes, verkleinertes Bild zwischen dem Mittelpunkte *C* und dem Hauptbrennpunkte *F* entwerfen.

Die Bilder, welche wir so eben betrachtet haben, sind von denen der ebenen Spiegel wesentlich verschieden. Alle Strahlen, welche von einem leuchtenden Punkte ausgehen, werden von einem ebenen Spiegel in einer solchen Richtung reflectirt, als ob sie von einem Punkte hinter dem Spiegel herkämen, sie divergiren also. In den eben betrachteten Fällen wurden aber die von einem Punkte des Gegenstandes ausgehenden Strahlen durch den Spiegel wirklich wieder in einem Punkte gesammelt; wir wollen deshalb auch diese Bilder zum Unterschiede von den anderen Sammelbilder nennen. Diese Sammelbilder kann man auf einem Schirme von weißem Papiere oder mattgeschliffenem Glase auffangen und so ein Bild erhalten, welches sich gerade so verhält wie der Gegenstand selbst; die durch die Concentration der Strahlen stark erleuchteten Punkte des Schirms zerstreuen nämlich das Licht nach allen Seiten hin, und somit wird das Bild selbst dann noch sichtbar, wenn die vom Spiegel reflectirten Strahlen nicht direct ins Auge gelangen.

Fig. 267.

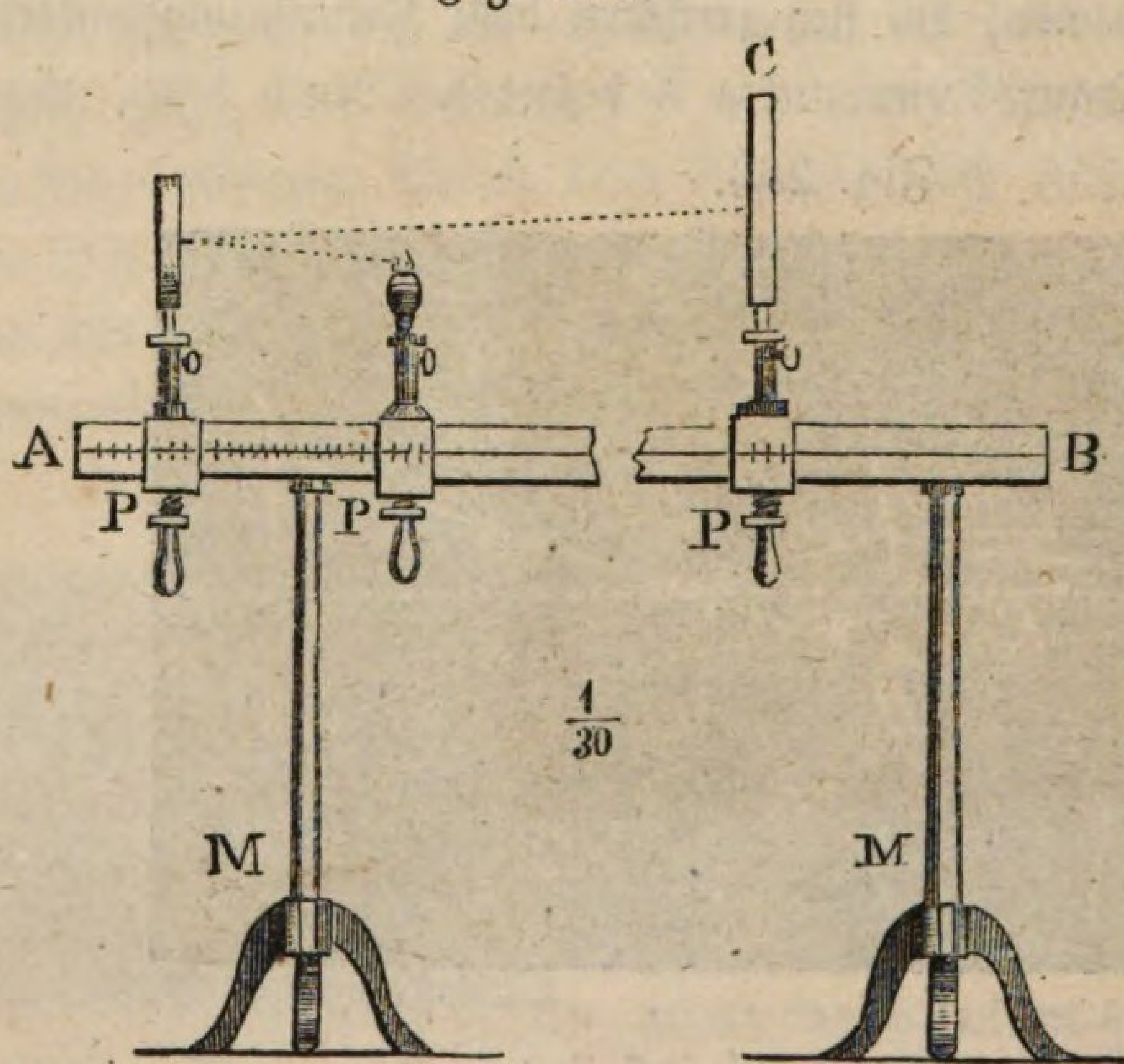


Fig. 267 stellt einen Apparat dar, welcher dazu dient, die Gesetze der durch Hohlspiegel erzeugten Sammelbilder nachzuweisen. Statt des getheilten Stabes mit den verschiebbaren Hülsen, kann man auch eine Rinne mit Schiebern wie Fig. 251 anwenden.

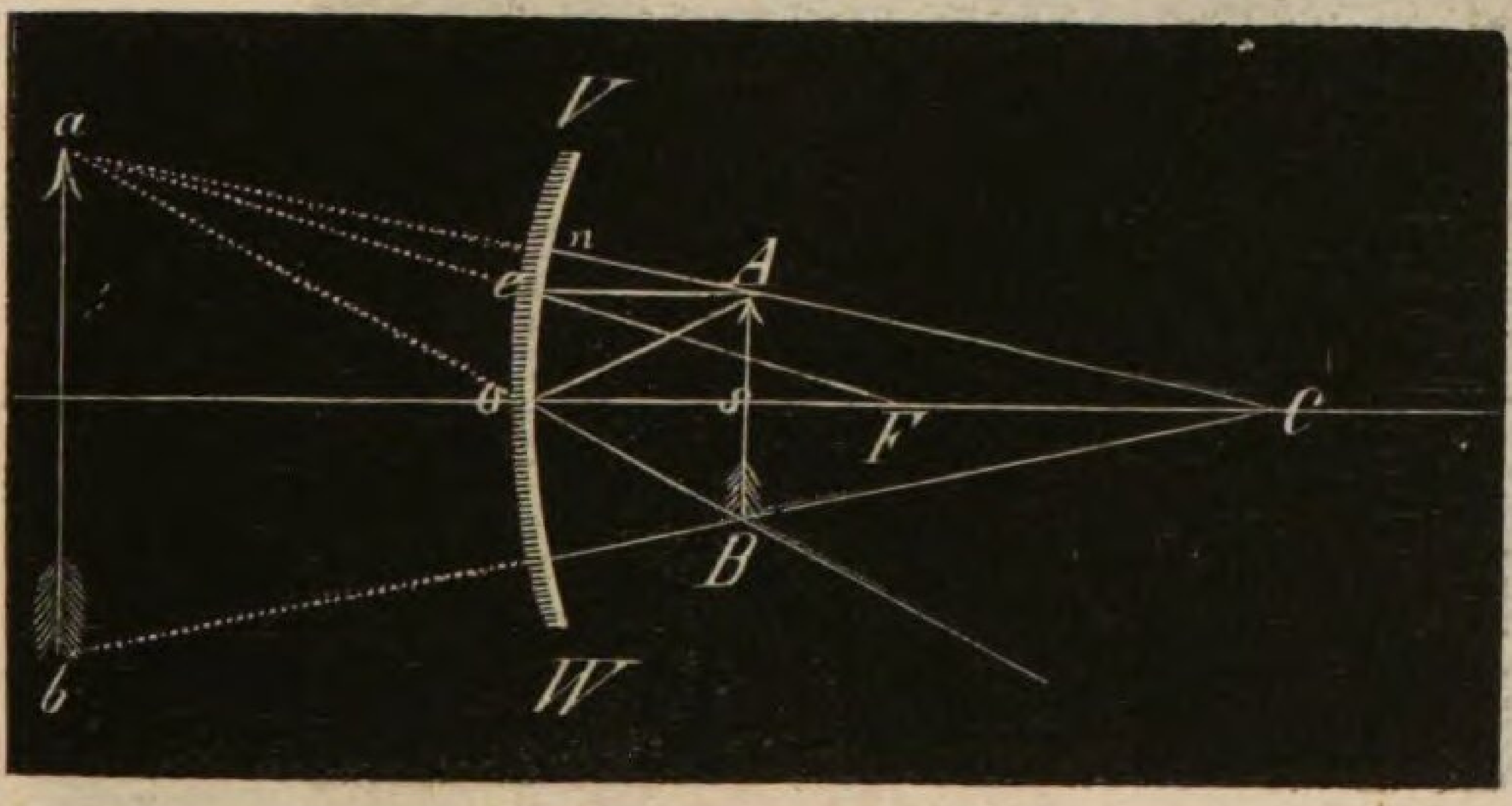
Je weiter der Gegenstand von dem Hohlspiegel sich entfernt, desto mehr muß sich begreiflicher Weise das Bild dem Hauptbrennpunkte nähern, das Bild der gleichsam unendlich weit entfernten Sonne muß also im Hauptbrennpunkte selbst liegen, wenn die Axe des Spiegels nach der Sonne gerichtet ist. Fallen die Sonnenstrahlen schräg, also nicht in der Richtung der Spiegelaxe, auf, so liegt das Bild natürlich nicht mehr in der Spiegelaxe, sondern seitwärts, seine Entfernung von dem Spiegel ist aber stets dem halben Krümmungsdurchmesser desselben gleich. Da uns die Sonne unter einem Winkel von ungefähr 30′ erscheint, so muß auch das Sonnenbildchen, von *C* aus gesehen, unter demselben Winkel erscheinen, seine absolute Größe hängt also von dem Krümmungshalbmesser des Spiegels ab. Im Brennpunkte des großen Reflectors von Herschel z. B., dessen Krümmungshalbmesser 50 Fuß ist, hat das Sonnenbild ungefähr 3 Zoll Durchmesser; der Durchmesser des Sonnenbildes ist ungefähr 3 Millimeter, wenn der Krümmungshalbmesser des Spiegels 1 Meter ist.

Um den Krümmungshalbmesser eines Hohlspiegels zu finden, braucht man nur zu messen, wie weit das Sonnenbildchen vom Spiegel liegt; denn diese Entfernung doppelt genommen ist ja dem Krümmungshalbmesser des Spiegels gleich.

Die Bilder solcher Gegenstände, welche um mehr als die 100fache Länge des Krümmungshalbmessers vom Spiegel entfernt sind, sind auch noch dem Brennpunkte selbst ganz außerordentlich nahe.

Wir haben jetzt die Lage des Bildes nur noch für den Fall zu ermitteln, daß der Gegenstand zwischen dem Spiegel und dem Brennpunkte liegt. Wir haben gesehen, daß alle Strahlen, welche von einem leuchtenden Punkte ausgehen, der dem Hohlspiegel näher liegt als der Hauptbrennpunkt, so reflectirt werden, als ob sie von einem Punkte hinter dem Spiegel herkämen; in dem eben zu betrachtenden Falle kann also natürlich kein Sammelbild entstehen.

Fig. 268.

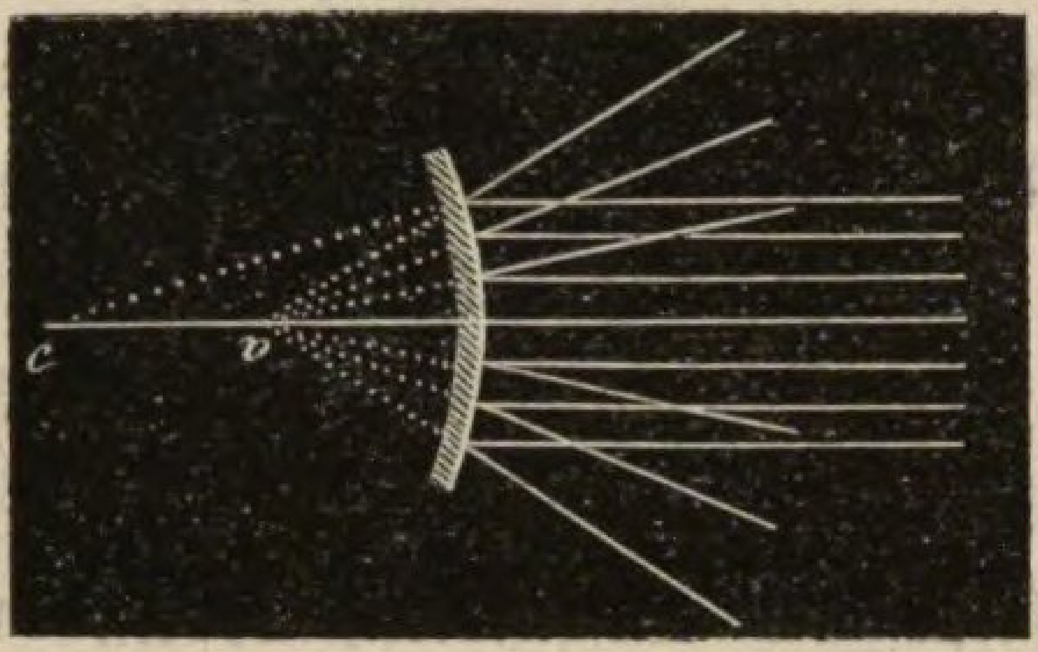


In Fig. 268 sey *AB* der Gegenstand, dessen Bild wir suchen wollen. Der Strahl *An*, welcher rechtwinklig auf den Spiegel fällt, wird in der Richtung *nAC* reflectirt, der Strahl *Ae* aber, welcher parallel mit der Spiegelaxe auf den Spiegel trifft, wird nach dem Hauptbrennpunkte *F* zurückgeworfen; nun aber treffen die Strahlen *nAC* und *eF* niemals zusammen, rückwärts verlängert schneiden sich aber ihre Richtungen hinter dem Spiegel in *a*, dieser Punkt *a* ist das Bild von *A*. Ebenso läßt sich

das Bild *b* des Punktes *B* finden; wenn also der Gegenstand zwischen dem Brennpunkte und dem Spiegel liegt, so fällt sein vergrößertes aufrechtes Bild hinter den Spiegel, es verhält sich also, die Vergrößerung abgerechnet, ganz wie die Bilder der ebenen Spiegel.

115 **Die Convexspiegel** haben keine wirklichen, sondern nur eingebildete Brennpunkte, d. h. die Strahlen, welche sie treffen, werden nicht in einem Punkte vereinigt, sondern sie divergiren nach der Spiegelung so, als ob sie von einem Punkte hinter dem Spiegel herkämen. Wenn ein Convexspiegel von Strahlen getroffen wird, welche mit der Axe parallel sind, so liegt für diese der eingebildete Hauptbrennpunkt in der Mitte zwischen dem Spiegel und dem Mittelpunkte *c*. Demnach ist es leicht, die Bilder zu construiren, welche man durch solche Spiegel erhält.

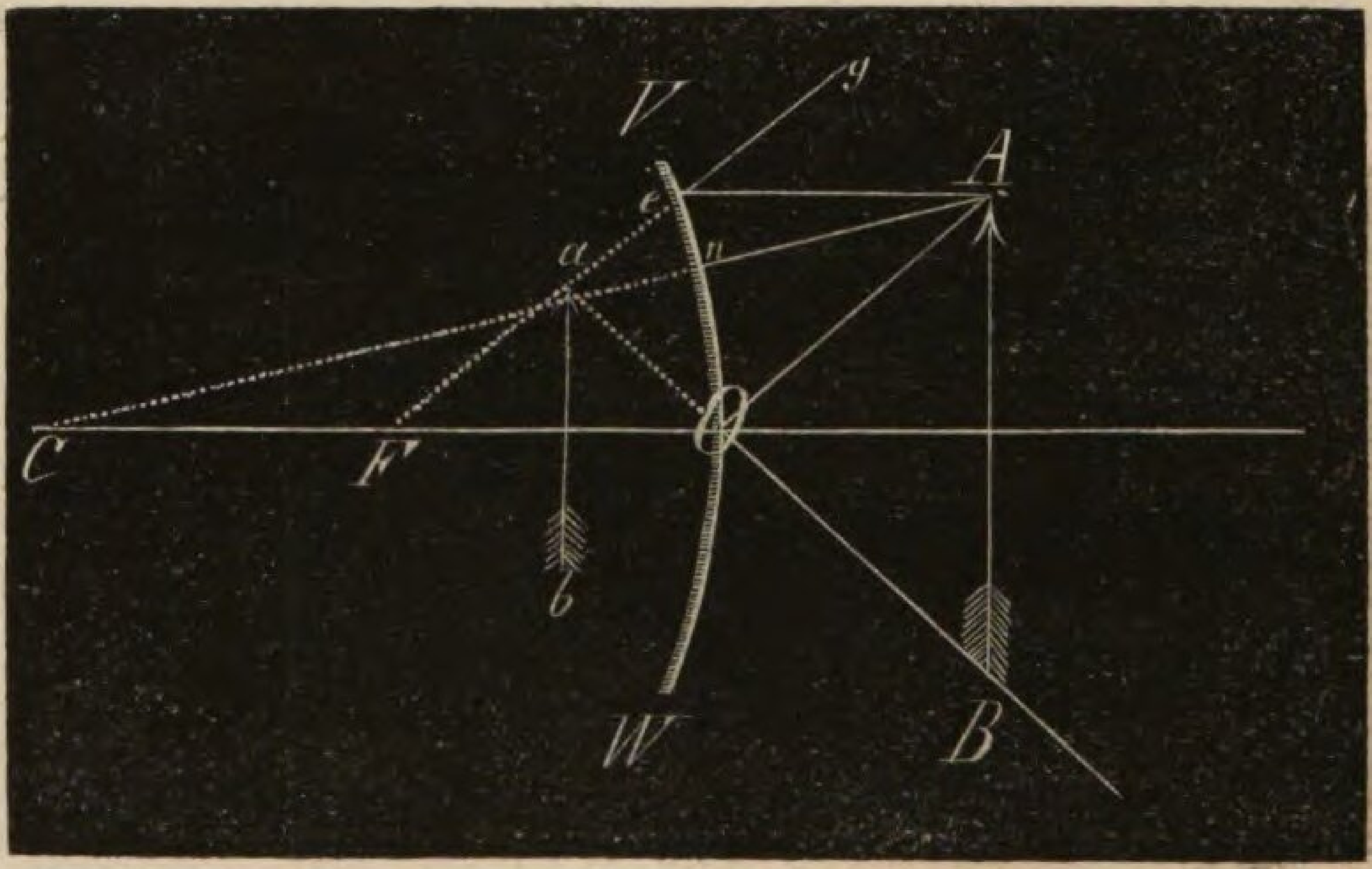
Fig. 269.



Es sey Fig. 270 *VW* der Convexspiegel, *AB* ein Gegenstand vor demselben. Ein Strahl *An*, welcher rechtwinklig auf den Spiegel fällt, wird in der Richtung *nA* reflectirt, der Strahl *Ae* aber, welcher parallel mit der Hauptaxe ist, wird nach der Richtung *eg* zurückgeworfen, als ob er von dem eingebildeten Hauptbrennpunkte *F* käme. Verlängert man *eg* und *nA* rückwärts, so schneiden sich diese Verlängerungen hinter dem Spiegel in *a*; hier ist also das Bild von *A*, d. h. alle von *A* ausgehenden Strahlen werden von dem Convexspiegel so reflectirt, als ob sie von *a* her kämen.

Nachdem man auch das Bild *b* des Punktes *B* gefunden hat, überzeugt

Fig. 270.

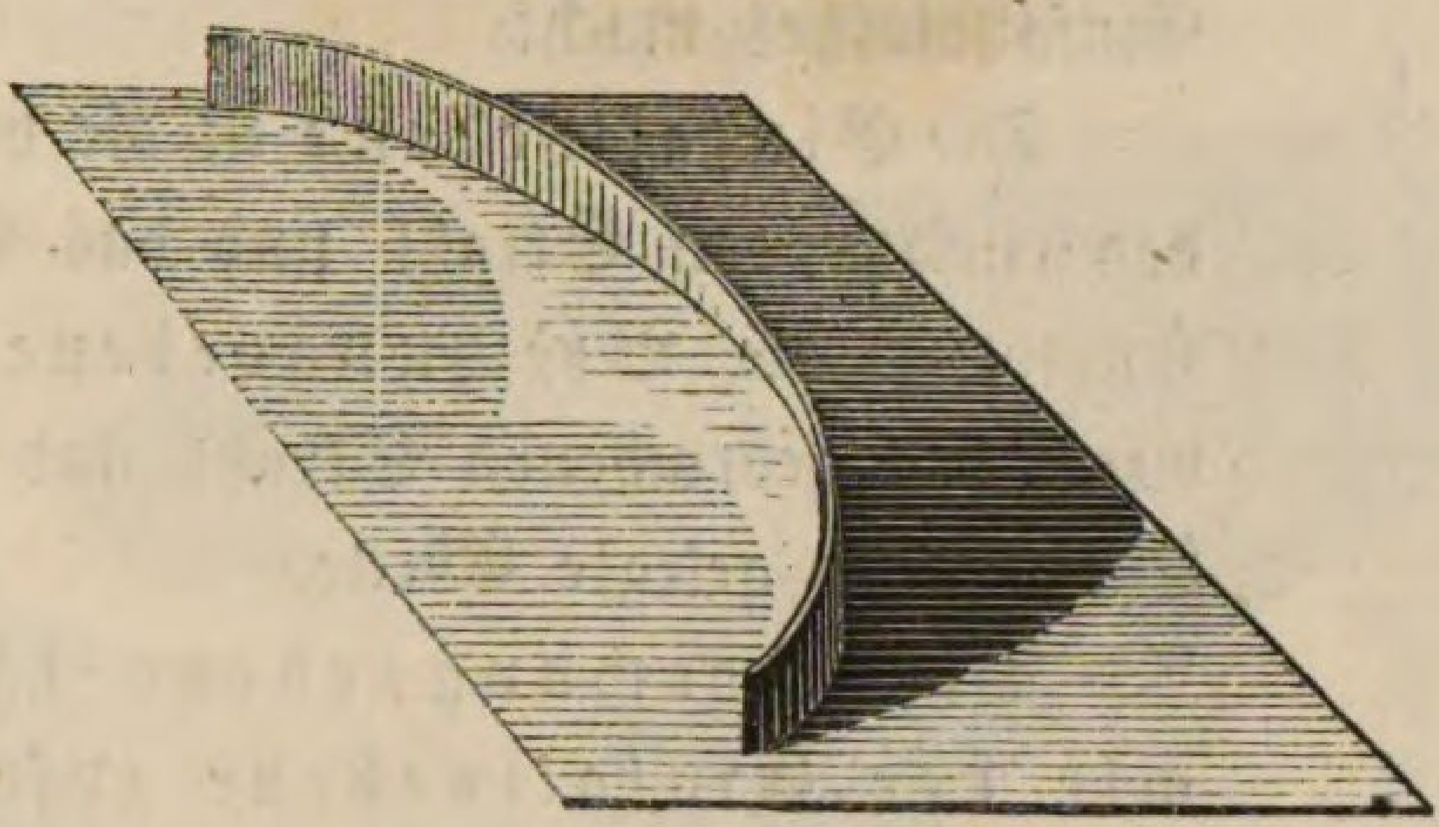


man sich leicht, daß man durch Convexspiegel verkleinerte aufrechte Bilder hinter dem Spiegel erhält.

116 **Von den Brennlinien.** Wenn die von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Lichtstrahlen nach ihrer Reflexion durch eine krumme Oberfläche nicht

genau in einem und demselben Punkte wieder vereinigt werden, so werden sich doch immer je zwei benachbarte reflectirte Strahlen schneiden; alle Durchschnittspunkte je zweier benachbarten in einerlei Ebene reflectirten Strahlen geben eine krumme Linie, die man **Brennlinie** oder **kaustische Linie** nennt und deren Natur von der Natur der spiegelnden Fläche abhängt. Alle durch eine spiegelnde krumme Oberfläche erzeugten Brennlinien bilden zusammengenommen eine krumme Fläche, welche **kaustische Fläche** heißt. In der Nähe derselben ist die Intensität des Lichts am größten, wie man dies an der herzförmigen Linie sehen kann, die sich innerhalb eines cylindrischen Gefäßes oder eines Ringes zeigt, wenn dasselbe vom Sonnenlichte oder dem Lichte einer Flamme beleuchtet wird. Die Fig. 271 zeigt eine solche Brennlinie, welche durch einen gekrümmten spiegelnden Streifen erzeugt wird.

Fig. 271.



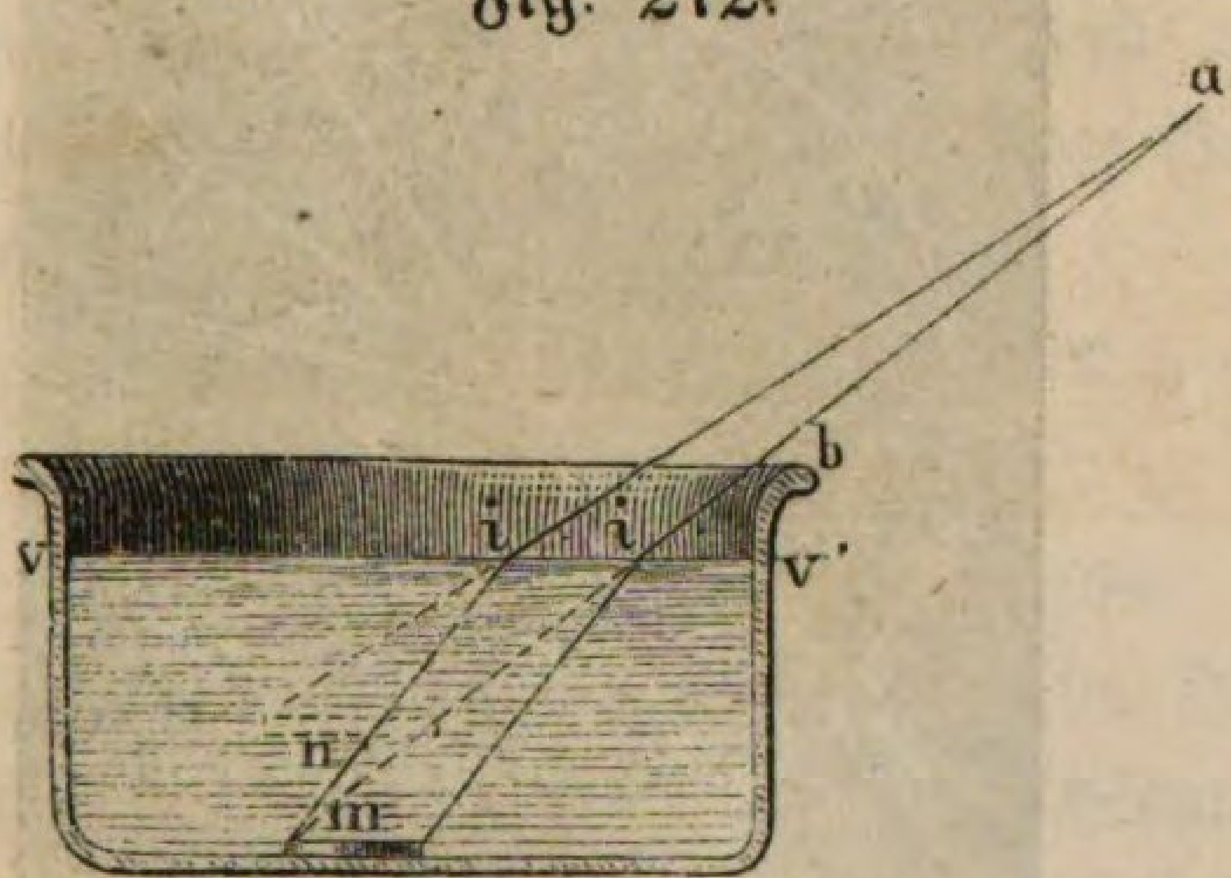
Zweites Kapitel.

Dioptrik oder Brechung des Lichts.

Das Brechungsgesetz. Unter **Brechung** versteht man die Ablenkung, 117
die Richtungsveränderung, welche ein Lichtstrahl erleidet, wenn er aus einem Mittel in ein anderes übergeht. Daß überhaupt eine solche Richtungsveränderung stattfindet, davon kann man sich leicht durch folgenden Versuch überzeugen.

Auf den Boden eines Gefäßes *vv'*, Fig. 272, lege man ein Geldstück oder sonst ein Metallstück *m* und halte das Auge *o* so, daß man eben den Rand desselben sieht, während das ganze Stück durch den Rand *b* des Gefäßes verdeckt erscheint. Wenn nun Wasser in das Gefäß gegossen wird, so scheint das Geldstück sich mehr und mehr zu erheben, wenn das Niveau des Wassers im Gefäße steigt, bis endlich das ganze Geldstück sichtbar ist und bei *n* zu liegen scheint, obgleich nach wie vor

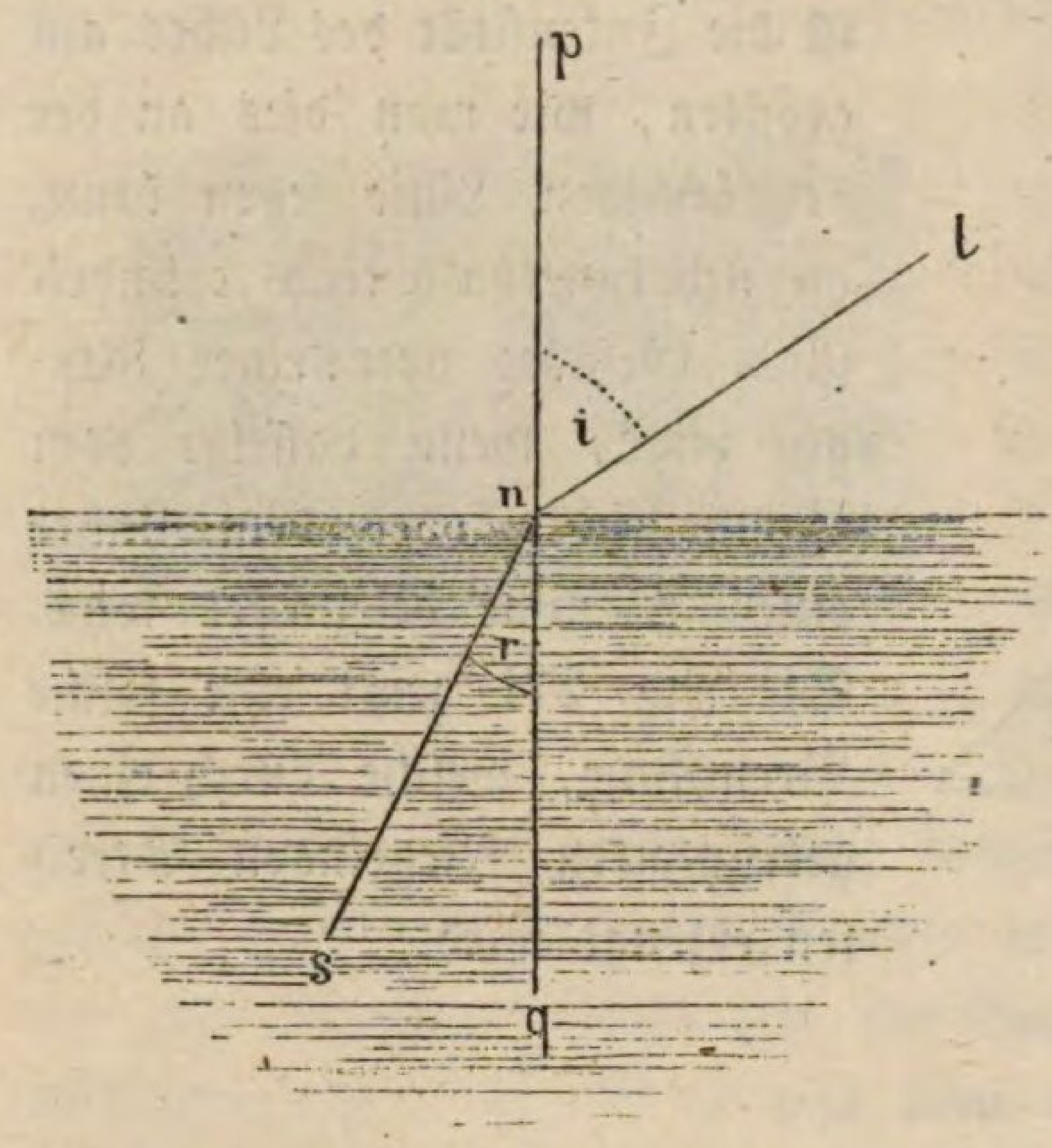
Fig. 272.



dieses sowohl als auch das Auge an seiner Stelle bleibt. Das Licht gelangt jetzt nicht mehr in gerader Linie von *m* nach *o*, sondern es beschreibt die gebrochene Linie *m i o*.

Der **Einfallswinkel** *i*, Fig. 273, ist bei der Brechung wie bei der Spiegelung der Winkel, welchen der einfallende Strahl *ln* mit der im Einfallspunkte errichteten Normalen, dem **Einfallslothe** *pn*, macht.

Fig. 273.



Der **Brechungswinkel** *r* ist derjenige, welchen der gebrochene Strahl *ns* mit der Verlängerung *nq* des Einfallslothes macht.

Die **Einfallsebene** ist die durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth, die **Brechungsebene** die durch den gebrochenen Strahl und das Einfallsloth gelegte Ebene.

Die Brechungsebene fällt mit der Einfallsebene zusammen; zwischen dem Einfallswinkel und dem Brechungswinkel besteht aber folgende Beziehung.

In Fig. 274 sey *lb* ein Lichtstrahl, welcher auf eine Wasserfläche trifft, *bf* sey der entsprechende gebrochene Strahl. Denkt man sich nun um *b* einen Kreis gezogen, so schneidet derselbe den einfallenden Strahl bei *a*, den gebrochenen bei *f*; fällt man nun von *a* ein Perpendikel *ad*, von *f* ein Perpendikel fd' auf das Einfallsloth, so wird fd' $\frac{3}{4}$ von ad seyn.

Dieselbe Beziehung findet nun beim Uebergange eines Lichtstrahls von Luft in Wasser zwischen der Richtung des einfallenden und des gebrochenen Strahls immer Statt. Wenn in Fig. 275 der einfallende Strahl $l'c$ nach cr', lc nach cr, $l''c$ nach cr'' gebrochen wird, so ist $r''f'' = \frac{3}{4}\, l''d''$, $rf = \frac{3}{4}\, ld$, $r'f' = \frac{3}{4}\, l'd'$.

Fig. 274.

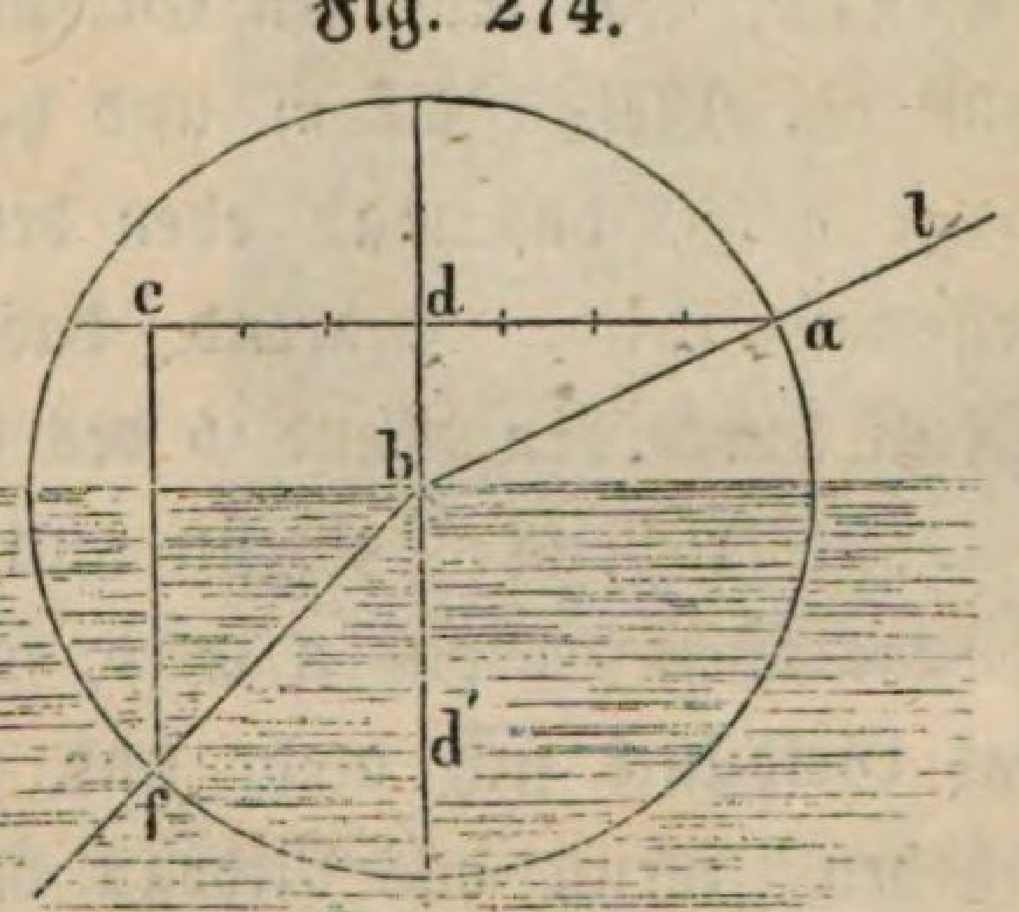
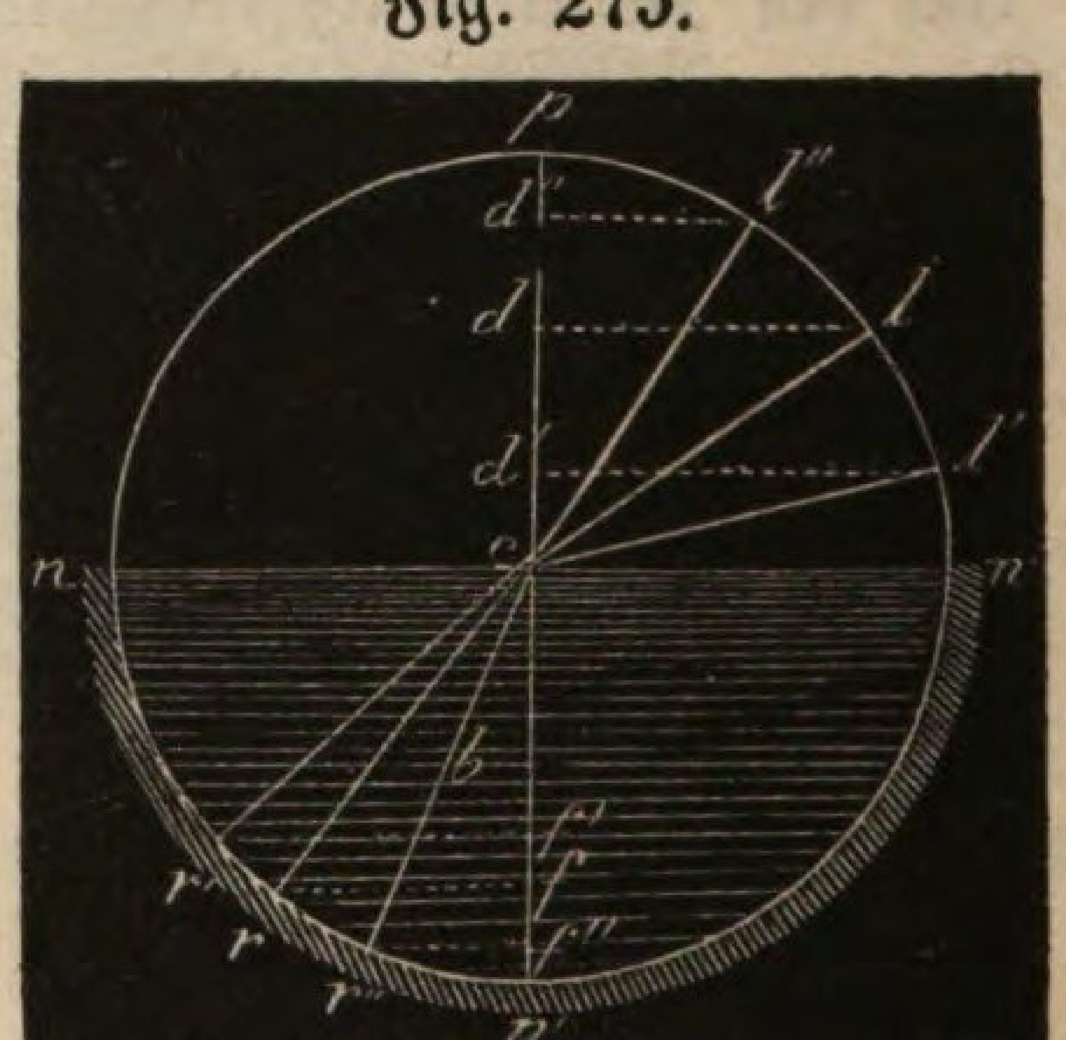


Fig. 275.

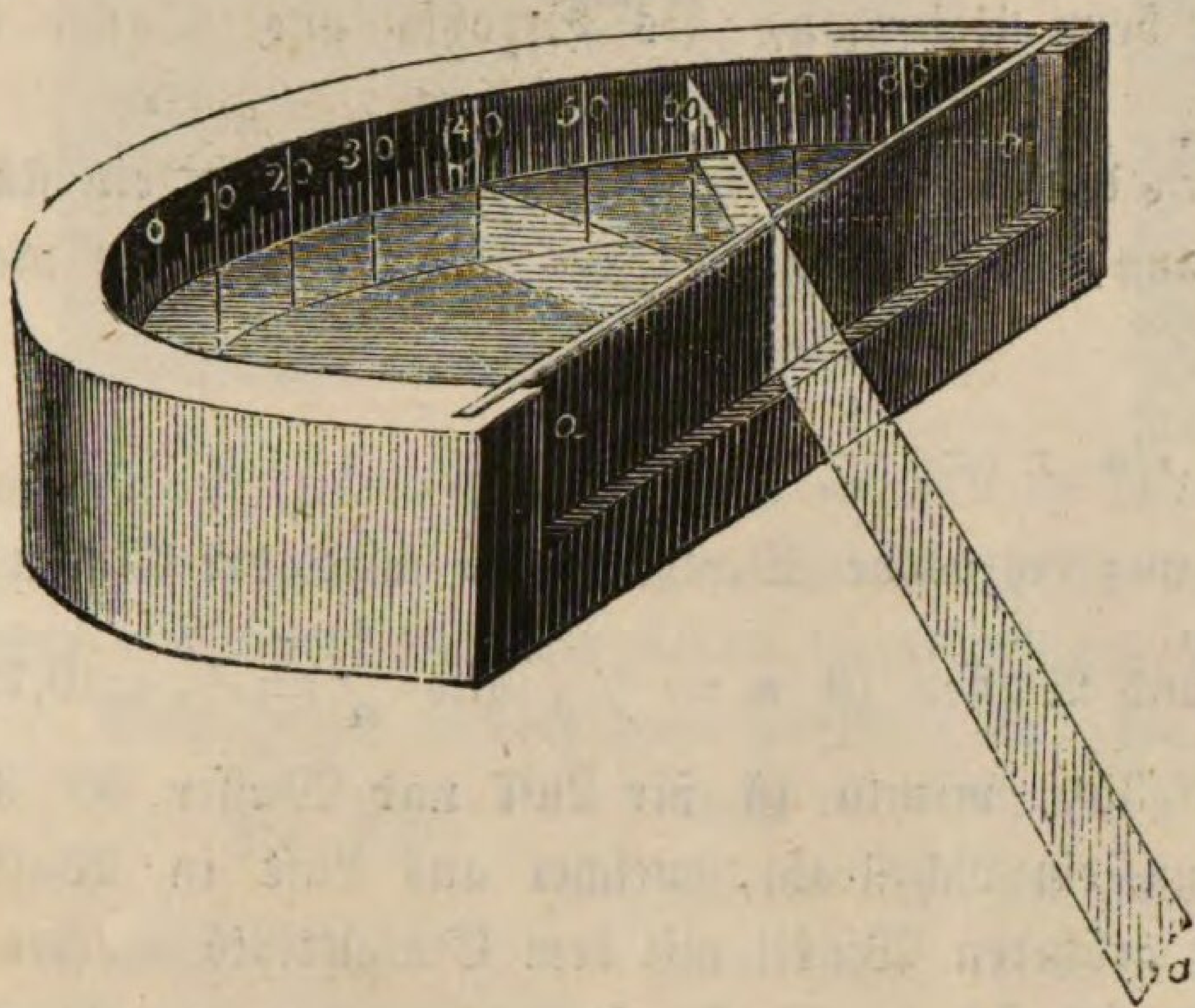


Wenn der Radius des Kreises, Fig. 275, = 1 gesetzt wird, so nennt man die erwähnten Perpendikel die **Sinus** der entsprechenden Winkel; es ist $l'd'$ der Sinus des Winkels $l'cp$, $ld = sin.\ lcp$, $l''d'' = sin.\ l''cp$; ebenso ist $r'f' = sin.\ r'cp'$; $rf = sin.\ rcp'$; $r''f'' = sin.\ r''cp'$. Durch die Einführung dieser Bezeichnung läßt sich aber nun das Brechungsgesetz für den Uebergang der Lichtstrahlen aus Luft in Wasser ganz einfach so ausdrücken:

Der Sinus des Brechungswinkels ist stets ¾ von dem Sinus des entsprechenden Einfallswinkels.

Das **Brechungsgesetz**, wie es **eben** auseinandergesetzt wird, läßt sich mit Hülfe des Apparates Fig. 276 nachweisen. Das Gefäß ist zur Hälfte seiner Höhe mit Wasser gefüllt. Ein Lichtstrahl nun, welcher durch eine Spalte in der Mitte der undurchsichtigen Wand ab in das Gefäß eindringt, wird in der oberen Hälfte in gerader Richtung fortgehen, im Wasser aber gebrochen werden. An der Theilung der hinteren halbkreisförmigen Wand kann man die Größe des Einfalls- und des Brechungswinkels ablesen. Es versteht sich von selbst, daß die Spalte in der Mitte von ab durch Glas verschlossen ist. Am besten macht man die Wand ab aus einer Glasplatte, welche bis auf einen schmalen Streifen in der Mitte mit undurchsichtiger Farbe bestrichen ist.

Fig. 276.



Beim Uebergang aus Luft in Glas erleiden die Lichtstrahlen nun eine stärkere Ablenkung; denn in diesem Falle ist der Sinus des Brechungswinkels ungefähr ⅔ vom Sinus des Einfallswinkels.

Der Quotient, welchen man erhält, wenn man den Sinus des Brechungswinkels in den Sinus des Einfallswinkels dividirt, ist für jede Substanz ein anderer; dieser Quotient wird mit dem Namen des **Brechungsexponenten** bezeichnet. Der Werth des Brechungsexponenten ist beim Uebergange des Lichtstrahls aus Luft in

Wasser	. . .	$^4/_3$
Glas	. . .	$^3/_2$
Diamant	. .	$^5/_2$.

Beim Uebergange aus Luft in Diamant ist also der Sinus des Einfallswinkels $2\frac{1}{2}$mal so groß als der Sinus des Brechungswinkels; im Diamant erleiden also die Lichtstrahlen eine sehr starke Ablenkung, der Diamant ist eine sehr stark brechende Substanz.

Allgemein läßt sich also das Brechungsgesetz so ausdrücken:

$$\frac{sin.\ i}{sin.\ r} = n.$$

Ist n der Brechungsexponent beim Uebergang des Strahls aus dem Mittel A in das Mittel B, ist ferner m der Brechungsexponent beim Uebergang aus A in das Mittel C, so ist $\frac{m}{n}$ der Brechungsexponent beim Uebergang von B in C.

Es ist z. B. $\frac{4}{3}$ der Brechungsexponent beim Uebergang aus Luft in Wasser, er ist $\frac{3}{2}$, wenn der Strahl aus Luft in Glas übergeht, folglich ist $\frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$ der Brechungsexponent beim Uebergang des Strahls aus Wasser in Glas.

Der größte Werth, welchen der Einfallswinkel beim Uebergang in ein stärker brechendes Mittel haben kann, ist 90°, und da $sin.\ 90° = 1$, so hat man für diesen Fall

$$sin.\ r = \frac{1}{n}.$$

Der sich aus dieser Gleichung ergebende Werth von r wird der Gränzwinkel genannt. Für Luft und Wasser ist $n = \frac{4}{3}$, also $\frac{1}{n} = \frac{3}{4} = 0{,}75$; nun ist aber $0{,}75 = sin.\ (48°\ 35')$, mithin ist für Luft und Wasser 48° 35′ der Gränzwinkel; niemals kann ein Lichtstrahl, welcher aus Luft in Wasser tritt, nach der Brechung einen größeren Winkel mit dem Einfallsloth machen.

Wenn hingegen ein Lichtstrahl, sich im Wasser fortpflanzend, einen Winkel von 48° 35′ mit einem Einfallsloth macht, so wird er nach seinem Austritt in die Luft einen Winkel von 90° mit dem Loth machen, d. h. er wird sich parallel der Trennungsfläche bewegen; alle im Wasser sich bewegenden Strahlen aber, welche mit dem Einfallsloth einen Winkel machen, der den Werth des Gränzwinkels übersteigt, können gar nicht mehr austreten, sie werden an der Gränzfläche des Wassers vollständig gespiegelt. Dieser Fall der totalen Reflexion ist der einzige Fall einer Spiegelung auf durchsichtigen Körpern, bei welcher der Strahl fast nichts an seiner ursprünglichen Intensität verliert.

118 **Brechung des Lichts in Prismen.** Wenn ein Lichtstrahl aus einem Mittel A in B und aus B wieder in A übergeht, so ist der austretende Strahl $n'l'$, Fig. 277, dem eintretenden parallel, wenn die beiden Gränzflächen von B einander parallel sind; ist dies jedoch nicht der Fall, so wird die Richtung des austretenden Strahls mehr oder weniger von der des eintretenden abweichen, Fig. 278. Mit Hülfe des Brechungsgesetzes ist es leicht, in jedem bestimmten Falle der Art den Weg des Lichtstrahls zu verfolgen.

In der Optik nennt man nun ein von zwei gegen einander geneigten Flächen begränztes Mittel ein Prisma. — Die Kante des Prismas ist die Linie, in welcher sich die beiden Gränzflächen schneiden oder doch schneiden würden, wenn sie hinreichend verlängert wären. — Die Basis eines Pris-

mas ist irgend eine der brechenden Kante gegenüberliegende Fläche, mag sie nun in der Wirklichkeit vorhanden, oder mag sie nur gedacht seyn. — Der brechende Winkel ist der Winkel, welchen die brechenden Flächen des Prismas mit einander machen. — Hauptschnitt nennt man den Durchschnitt des Prismas mit einer auf seiner Kante rechtwinkligen Ebene.

Fig. 277.

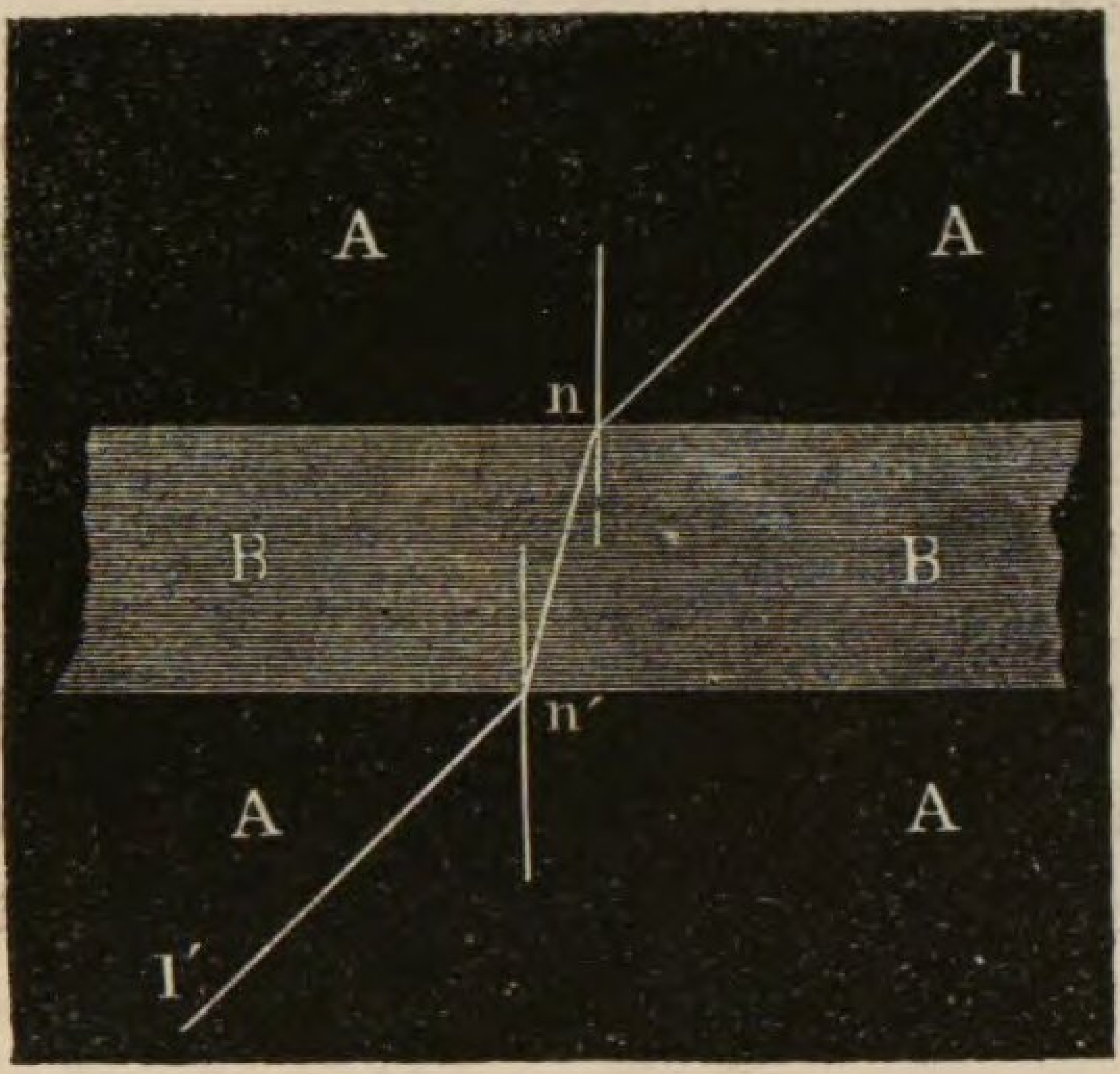
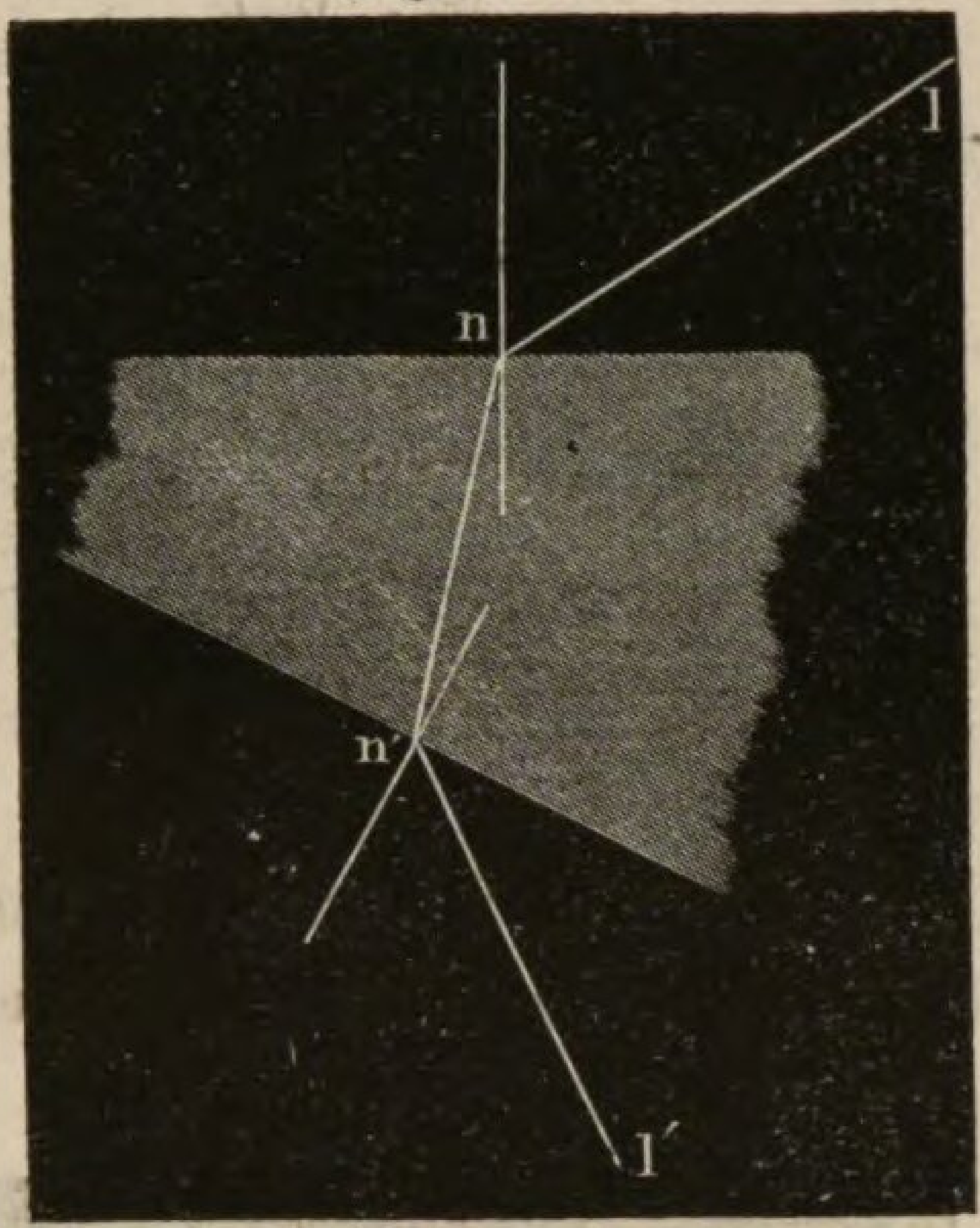
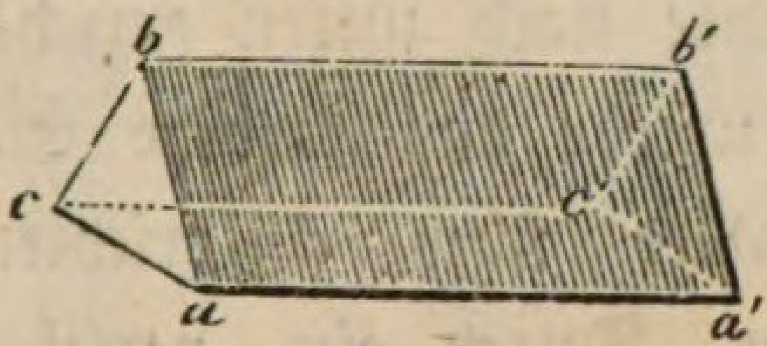


Fig. 278.



Gewöhnlich wendet man Prismen an, welche durch drei rechtwinklige Flächen *a b a′ b′*, *b c b′ c′* und *c a c′ a′* begränzt sind. Wenn das Licht durch die Flächen *ab′* und *ac′* hindurchgeht, so ist *a a′* die brechende Kante und die Fläche *b c′* die Basis; *b b′* ist brechende Kante, wenn der Lichtstrahl durch die Flächen *b a′* und *b c′* geht u. s. w.

Fig. 279.



Der Hauptschnitt eines solchen Prismas ist ein Dreieck, und je nachdem dieses Dreieck rechtwinklig, gleichschenklig oder gleichseitig ist, nennt man auch das Prisma selbst rechtwinklig, gleichschenklig oder gleichseitig.

Fig. 280.

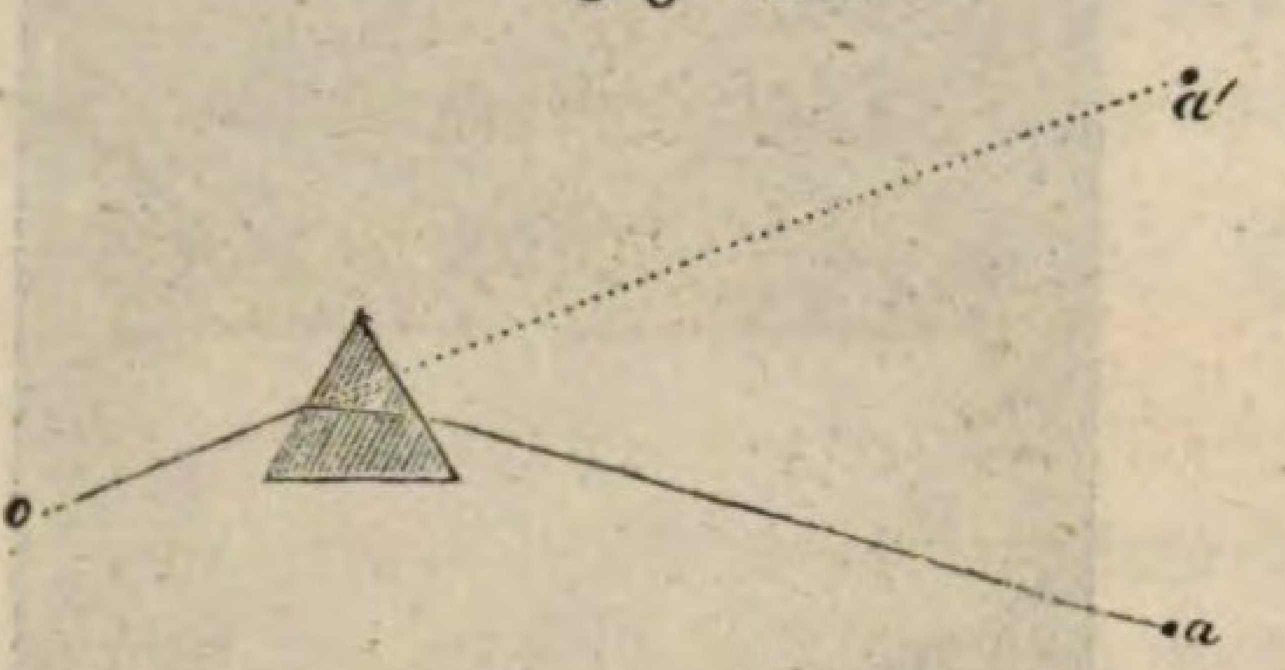


Gewöhnlich befestigt man die Prismen auf einem messingenen Stativ, Fig. 280. Indem man das Stäbchen *t* in der Röhre, in der es steckt, auf- und niederschiebt, kann man das Prisma höher oder tiefer stellen, und mittelst des Charniers bei *g* kann man ihm jede beliebige Stellung geben.

Hält man ein Prisma so, daß die brechende Kante nach oben gerichtet ist, so beobachtet man beim Hindurchsehen Folgendes: erstens erscheinen alle Gegenstände bedeutend von dem Orte, den sie wirklich einnehmen, verrückt, und zwar scheinen sie gehoben, das Auge *o*, Fig. 281, s. f. S., erblickt durch das Prisma den Gegenstand *a* in *a′*; zweitens aber scheinen sie mit farbigen Rändern. Wäre die brechende Kante nach unten gerichtet gewesen, so würden alle Gegenstände, durch das Prisma gesehen, nach unten verrückt erscheinen. Ein vertikales

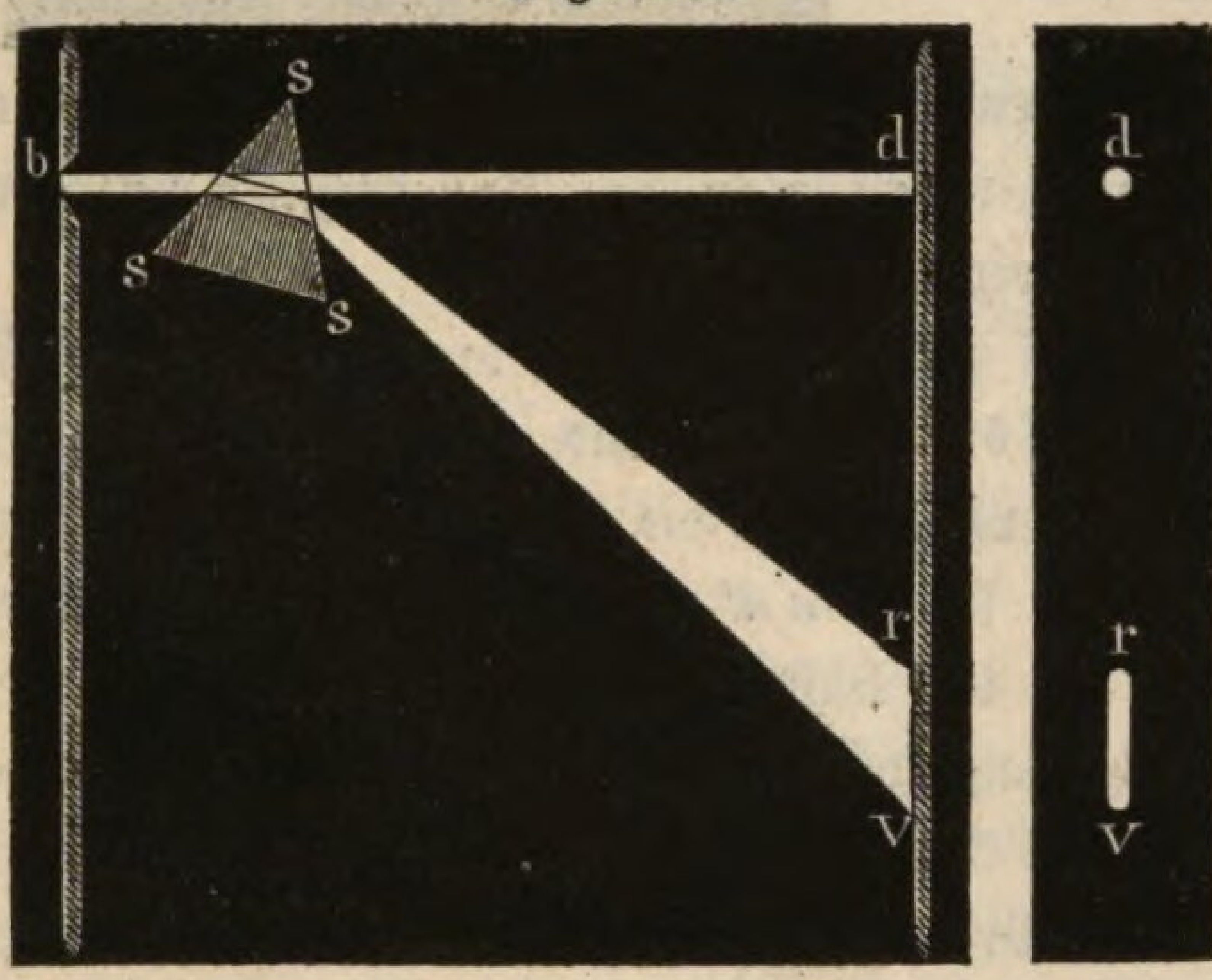
Prisma verrückt die Gegenstände nach der rechten oder linken Seite, je nachdem die brechende Kante auf der rechten oder linken Seite sich befindet. Wenn man die Versuche auf diese Weise abändert, so überzeugt man sich leicht, daß alle Gegenstände, durch das Prisma betrachtet, nach der Seite der brechenden Kante hin verrückt erscheinen.

Fig. 281.



Wenn ein Sonnenstrahl durch eine feine Oeffnung in der Richtung *b d* in ein dunkles Zimmer tritt, und man ihn durch ein Prisma auffängt, so beobachtet man ebenfalls eine Ablenkung und eine Färbung. Das Prisma habe eine horizontale Stellung und seine brechende Kante sey nach oben gerichtet, so erblickt man statt des weißen runden Sonnenbildchens, welches ohne das Prisma bei *d* erschienen wäre, ein ovales mit den Regenbogenfarben gefärbtes Bild, das **Sonnenspectrum**, in *r*. Wäre die brechende Kante nach unten gerichtet, so würde das farbige Sonnenbild über *d* erschienen seyn. Durch ein vertikales Prisma wird, je nach seiner Stellung, das Sonnenbild rechts oder links abgelenkt.

Fig. 282.



Die eben angedeuteten Farbenerscheinungen werden wir später betrachten, und uns vor der Hand nur mit der Ablenkung beschäftigen.

Ein Prisma lenkt unter übrigens gleichen Umständen die Lichtstrahlen um so stärker ab, je größer der brechende Winkel ist. Beträgt dieser Winkel 60°, so ist die Ablenkung stärker, als wenn er nur 45° betrüge.

Ein Prisma, welches aus einer stärker brechenden Substanz besteht, lenkt die Lichtstrahlen stärker ab, als ein ganz gleich geformtes Prisma einer schwächer brechenden Substanz. In einem Wasserprisma ist die Ablenkung geringer als in einem Glasprisma.

In einem und demselben Prisma hängt die Größe der Ablenkung noch von der Richtung ab, in welcher die Lichtstrahlen auf die erste Fläche treffen. Wenn man durch ein Prisma einen Gegenstand betrachtet, so sieht man, wie das Bild sich bald weiter von der Stelle des Gegenstandes entfernt, bald sich ihm wieder nähert, wenn man das Prisma um seine Axe dreht. Die kleinste Ablenkung findet für den Fall Statt, daß die Strahlen das Prisma symmetrisch

durchlaufen. Würde die Richtung des einfallenden Strahls nach der einen oder der anderen Seite hin verändert, so würde die Ablenkung zunehmen.

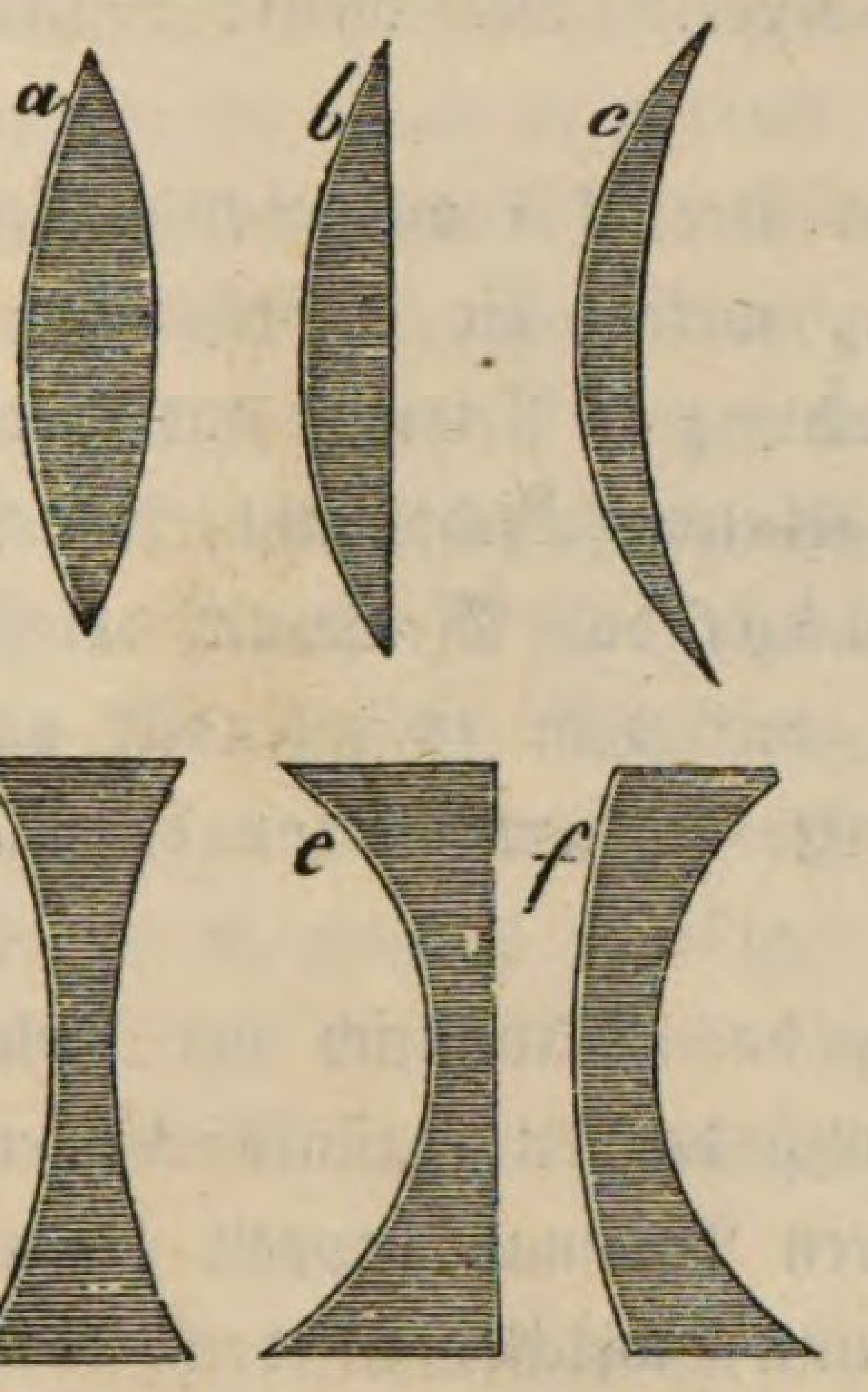
Um Prismen aus Flüssigkeiten zu bilden, wendet man Hohlprismen an, deren Seitenwände durch geschliffene Glasplatten gebildet sind.

Brechung des Lichts durch Linsen. Linsen nennt man durchsichtige 119
Körper, welche die Eigenschaft haben, die Convergenz durchgehender Strahlen zu vergrößern oder zu verkleinern.

Wir beschäftigen uns hier nur mit sphärischen Linsen, d. h. mit solchen, deren Gränzflächen Stücke von Kugeloberflächen und Ebenen sind, weil diese allein zu optischen Instrumenten verwendet werden. Man hat außerdem noch elliptische, parabolische, cylindrische u. s. w. Linsen, welche ähnliche Erscheinungen zeigen wie die sphärischen.

Man unterscheidet sechs verschiedene Arten von Linsen, welche Fig. 283 im Durchschnitte dargestellt sind. *a* stellt eine biconvexe Linse dar, d. h. eine solche, die durch zwei nach außen gewölbte Kugelflächen begränzt ist. Die planconvexe Linse *b* ist durch eine ebene und eine convexe Fläche begränzt. Die concav-convexen Linsen, welche durch eine convexe und eine hohle Fläche begränzt sind, wie *c* und *f*, werden auch Menisken genannt; man unterscheidet zwei Arten derselben, je nachdem die Krümmung der hohlen Fläche geringer ist, wie bei *c*, oder stärker, wie bei *f*. *d* stellt eine biconcave, *e* eine planconcave Linse vor.

Fig. 283.



Die drei ersteren, *a*, *b* und *c*, sind in der Mitte dicker als am Rande und heißen Sammellinsen.

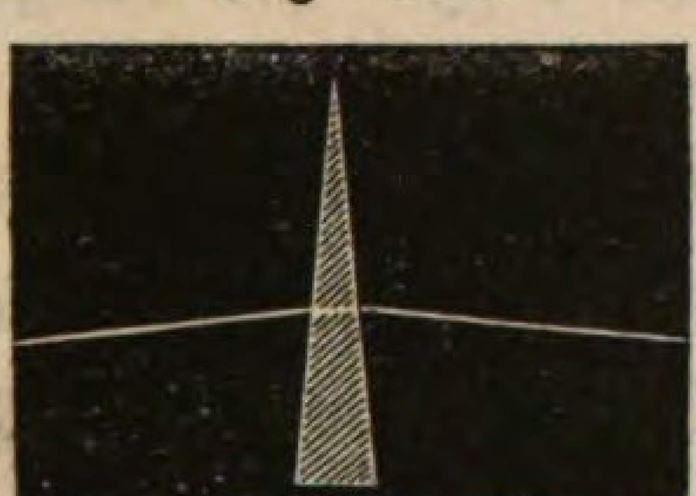
Die drei letzteren, *d*, *e* und *f*, welche in der Mitte dünner sind als am Rande, heißen Zerstreuungslinsen.

Die Axe einer Linse ist die gerade Linie, welche die Mittelpunkte der beiden Kugeloberflächen verbindet, durch welche die Linse gebildet wird. Bei den planconvexen und planconcaven Linsen ist die Axe das von dem Mittelpunkte der Krümmung auf die Ebene gefällte Perpendikel.

Um die wichtigsten Sätze über die Brechung des Lichts durch Linsen zu entwickeln, müssen wir noch einmal zu den Prismen zurückkehren und den Fall näher ins Auge fassen, daß der brechende Winkel des Prismas sehr klein ist.

In einem Prisma von kleinem brechenden Winkel, wie Fig. 284, ist nämlich ohne merklichen Fehler die Ablenkung dem brechenden Winkel proportional. Ein Prisma, dessen brechender Winkel doppelt so groß ist als bei dem Prisma Fig. 284, würde eine doppelt so große Ablenkung bewirken, und wenn der brechende Winkel des Prismas

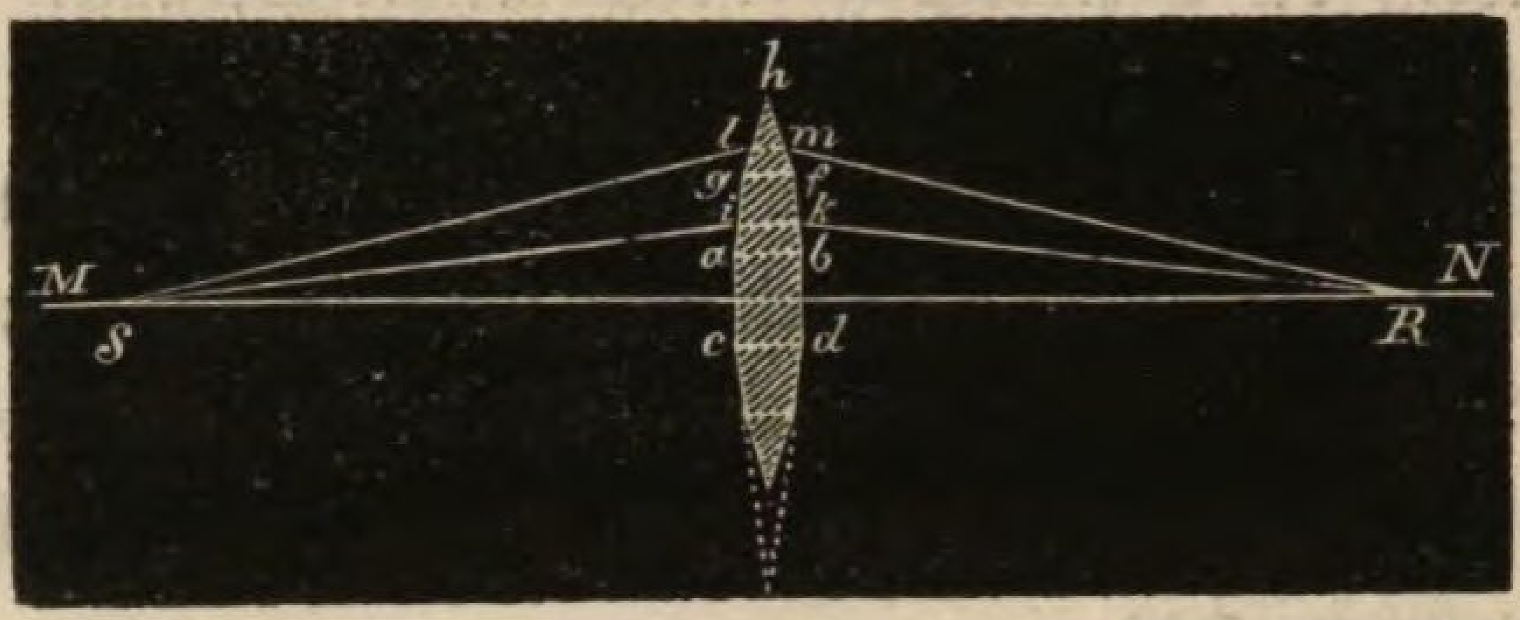
Fig. 284.



halb so groß wäre als in Fig. 284, so würde auch die Ablenkung nur halb so groß seyn.

In Fig 285 ist nun *a b c d* ein längliches Rechteck, an welches sich oben das Paralleltrapez *a b f g*, unten aber ein ganz gleiches ansetzt; oben setzt sich dann ein Dreieck *f g h* und unten ein gleiches an. Die beiden nicht parallelen Seiten der Paralleltrapeze bilden verlängert ein gleichschenkliges Dreieck, dessen spitzer Winkel halb so groß seyn soll als der spitze Winkel des oberen Dreiecks bei *h*.

Fig. 285.



Denkt man sich die ganze Figur um die Axe *M N* umgedreht, so entsteht ein aus mehreren Zonen gebildeter linsenartiger Körper. Die Mitte desselben bildet eine ebene Scheibe.

Wenn nun Lichtstrahlen, von einem Punkte der Axe *M N* ausgehend, dieses Zonensystem treffen, so kann man die Ablenkung, welche die Lichtstrahlen in einer jeden Zone erleiden, nach den Gesetzen der Brechung in Prismen entwickeln.

Der Punkt *S* liege so, daß ein von hier ausgehender Lichtstrahl, welcher die Fläche *a g* in *i* trifft, beim Durchgange durch *a b g f* das Minimum der Ablenkung erfährt, so wird der austretende Strahl mit dem einfallenden ganz symmetrisch seyn, er schneidet die Axe in einem Punkte *R*, welcher von der Linse ebenso weit absteht als *S*.

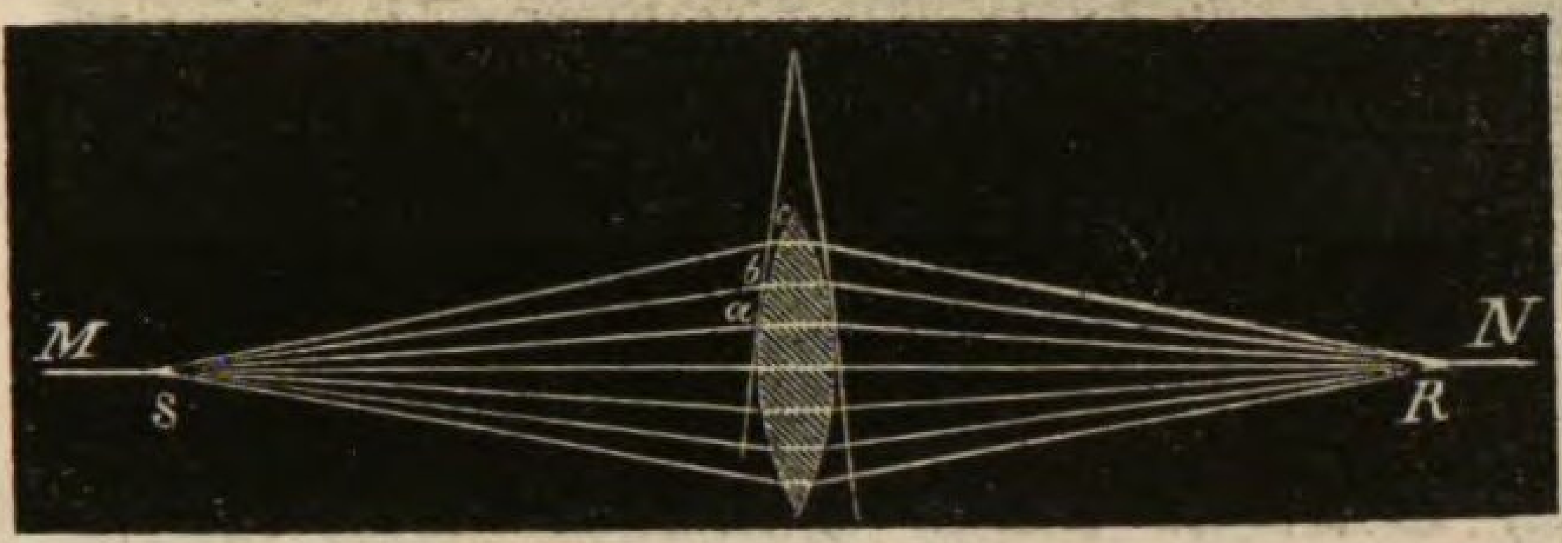
Ein Lichtstrahl, welcher in dem Dreiecke *h f g* das Minimum der Ablenkung erleidet, wird von seiner ursprünglichen Richtung doppelt so stark abgelenkt als in *f g a d*, weil der brechende Winkel des oberen Prismas doppelt so groß ist als der des unteren. Ein solcher Lichtstrahl nun, welcher in dem oberen Dreiecke das Minimum der Ablenkung erleidet, geht durch dieses Dreieck nach einer Richtung *l m*, welche mit der Axe *M N* parallel ist, der eintretende Strahl sowohl als der austretende wird aber mit dieser horizontalen Richtung nothwendig einen doppelt so großen Winkel machen als der eintretende und austretende Strahl, welcher das Minimum der Ablenkung in *a b f g* erlitten hat; wenn also von *S* ein Strahl *S l* ausgeht, welcher mit *M N* einen doppelt so großen Winkel macht als *S i*, so wird er in *f g h* das Minimum der Ablenkung erleiden, und, auf der anderen Seite symmetrisch austretend, nach *R* gebrochen werden. Der Strahl *S l m R* passirt die Linse in einer doppelt so großen Entfernung von der Axe als der Strahl *S i k R*, welcher nur eine halb so starke Ablenkung erleidet.

Denken wir uns nun die gebrochenen Linien *d b f h* und *c a g h* der vorigen Figur durch Kreisbogen ersetzt, deren Mittelpunkte auf der Axe *M N* liegen, so erhält man statt des eben betrachteten linsenförmigen Körpers eine förmliche Linse, Fig. 286, und ein Lichtstrahl, welcher an irgend einer Stelle, etwa in *a*, die Linse trifft, wird gerade so gebrochen, als sey er auf ein Prisma gefallen,

dessen Durchschnitt man erhält, wenn man in *a* und den gegenüber liegenden Punkten Tangenten an die Kreisbogen zieht.

Zöge man nun an einer zweiten Stelle *b*, welche doppelt so weit von der Axe entfernt ist als *a*, auf beiden Seiten solche Tangenten, so würden sich diese unter einem Winkel schneiden, welcher doppelt so groß ist als der Winkel, unter welchem sich die bei *a* gezogenen Tangenten schneiden.

Fig. 286.



Wenn nun ein Lichtstrahl die Linse bei *a* parallel mit der Axe durchläuft, so wird er vor seinem Eintritte und nach seinem Austritte aus der Linse gleiche Winkel mit der Axe machen, er wird sie in den Punkten *S* und *R* schneiden, welche zu beiden Seiten gleich weit von der Linse abstehen. Wenn nun von *S* ein zweiter Lichtstrahl ausgeht, welcher die Linse in *b* trifft, so wird er eine doppelt so starke Ablenkung erfahren als bei *a* und deshalb ebenfalls nach *R* hin gebrochen werden. Ein Lichtstrahl, welcher, von *S* ausgehend, in *c*, d. h. in einem Punkte die Linse trifft, welcher dreimal so weit von der Axe entfernt ist als *a*, wird eine dreimal stärkere Ablenkung erfahren als die bei *a* einfallenden und deshalb auch nach demselben Punkte *R* hin gebrochen werden.

Was für die Punkte *a*, *b* und *c* gesagt wurde, gilt auch für die zwischenliegenden; für eine solche Linse, wie Fig. 286, giebt es also auf der Axe einen Punkt *S*, welcher die Eigenschaft hat, daß alle von ihm ausgehenden Strahlen, welche die Linse treffen, durch dieselbe nach einem und demselben Punkte *R* hin concentrirt werden, welcher auf der anderen Seite eben so weit von der Linse absteht als *S*.

Die Schlüsse sind jedoch nur so lange gültig, als die Krümmung der Linse von der Mitte bis zum Rande nicht bedeutend ist; denn nur so lange ändert sich die Neigung der Tangenten in demselben Verhältnisse, wie die Entfernung ihrer Berührungspunkte von der Axe.

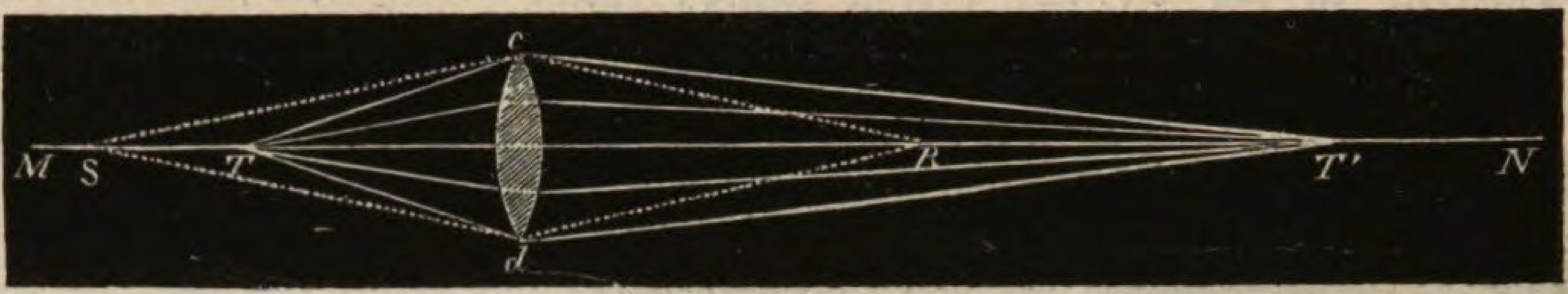
In dem Nächstfolgenden ist nur von solchen Linsen die Rede, bei denen die Krümmung von der Mitte bis zum Rande unbedeutend ist.

So lange der Winkel, unter welchem der einfallende Strahl ein Prisma von kleinem brechenden Winkel trifft, von einem rechten nicht viel abweicht, so lange also die Strahlen nahezu in der Richtung das Prisma treffen, welcher das Minimum der Ablenkung entspricht, wird die durch das Prisma hervorgebrachte Ablenkung von dem Minimum der Ablenkung nicht merklich verschieden seyn.

Dies gilt nun auch von Linsen. Wenn die Linse, Fig. 286, in *c* von einem Lichtstrahle getroffen wird, dessen Richtung von der Richtung *Sc* nicht sehr bedeutend abweicht, so wird die Ablenkung, welche er durch die Brechung in der Linse erfährt, dieselbe seyn wie die Ablenkung, welche der Strahl *Sc* erleidet.

In Fig. 287 sey *S* derjenige Punkt der Axe *MN*, welcher so liegt, daß die von ihm ausgehenden Strahlen, welche die Linse treffen, dieselbe symmetrisch

Fig. 287.



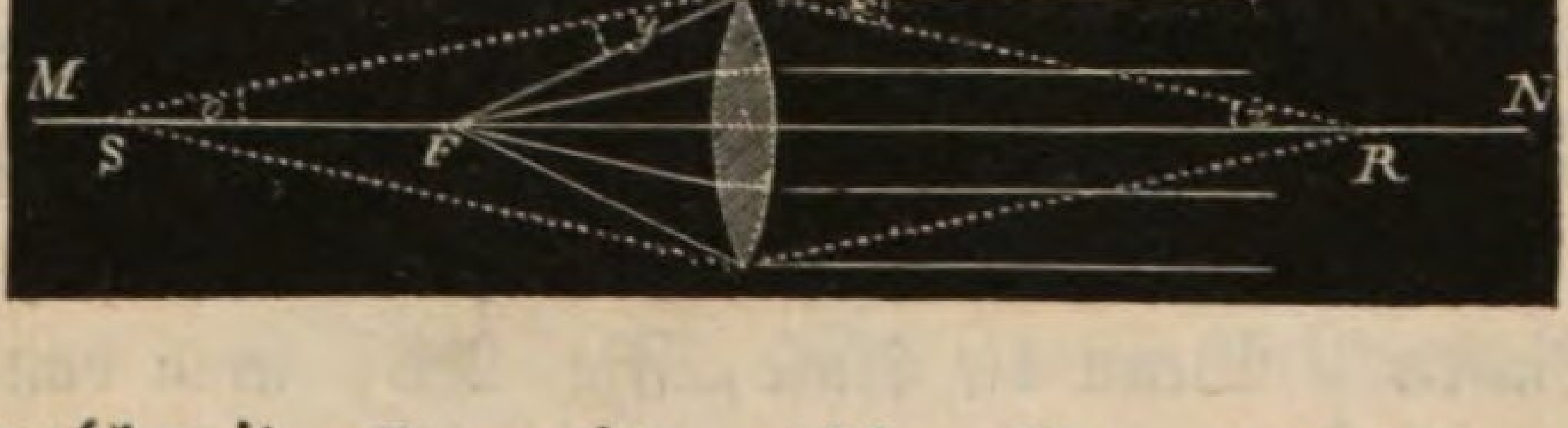
durchlaufen und auf der anderen Seite in einem Punkte *R* vereinigt werden, welcher eben so weit von der Linse absteht als *S*. Der Strahl *Sc*, welcher die Linse nahe am Rande trifft, wird nach *cR* gebrochen, der einfallende und der gebrochene Strahl machen den Winkel *ScR* mit einander. Wenn nun ein Lichtstrahl nicht von *S*, sondern von *T* ausgehend die Linse in *c* träfe, so würde nach dem, was eben auseinandergesetzt wurde, der Strahl *Tc* eine eben so starke Ablenkung erfahren als *Sc*, man würde also die Richtung des Strahls nach dem Austritte aus der Linse erhalten, wenn man die Linie *cT'* so zieht, daß der Winkel *TcT'* so groß ist wie der Winkel *ScR* oder, mit anderen Worten, wenn man über *cR* einen Winkel *RcT'* ansetzt, welcher eben so groß ist wie der Winkel, um welchen *Tc* unter *Sc* liegt.

Nach dem Punkte *T'* der Axe wird aber auch der Strahl *Td* gebrochen, welcher, von *T* ausgehend, den unteren Rand der Linse trifft, ja es werden alle Strahlen, welche, von *T* ausgehend, die Linse treffen, in *T'* concentrirt werden, denn in demselben Maaße, in welchem die einfallenden Strahlen der Axe näher liegen, werden sie auch weniger abgelenkt und deshalb sämmtlich in *T'* vereinigt.

Wenn also der leuchtende Punkt von *S* aus der Linse genähert wird, so wird sich der Vereinigungspunkt der Strahlen auf die andere Seite der Linse von derselben entfernen; je mehr sich *T* nähert, desto mehr entfernt sich *T'*, doch entfernt sich *T'* in einem weit rascheren Verhältnisse, als sich *T* nähert.

Untersuchen wir nun, wie die Strahlen durch die Linse gebrochen werden, welche von einem Punkte *F*, Fig. 288, der Axe ausgehen, welcher so liegt, daß $Fc = Fs$. In diesem Falle ist der Winkel $o = y = z$. Nun aber wird ja der Strahl *Fc* durch die Linse so gebrochen, daß der Winkel x, welchen der austretende Strahl mit *cR* macht, gleich y ist; es ist demnach $x = z$, und daraus folgt, daß der Strahl *Fc* durch die Linse so gebrochen wird, daß er mit der Axe parallel läuft.

Fig. 288.



Dasselbe gilt von allen übrigen von *F* ausgehenden Strahlen, welche die Linse treffen, sie treten als ein der Axe paralleles Strahlenbündel aus.

Wenn man, was wohl in den meisten Fällen erlaubt seyn wird, die Dicke der Linse gegen die Entfernungen der Punkte *S* und *F* von derselben vernachlässigt, so kann man sagen, der Punkt *F* liege in der Mitte zwischen *S* und der Linse.

Wenn also ein leuchtender Punkt von *S* aus der Linse genähert wird, so rückt der Vereinigungspunkt auf der anderen Seite von der Linse weg, und wenn der leuchtende Punkt bis *F* vorrückt, so wird der Vereinigungspunkt bis ins Unendliche fortgerückt, die Strahlen treten der Axe parallel aus.

Wenn aber umgekehrt von einem auf der Axe liegenden unendlich weit entfernten Punkte Strahlen auf die Linse fallen, oder, mit anderen Worten, wenn ein Bündel mit der Axe paralleler Strahlen die Linse trifft, so werden sie durch die Linse in *F* vereinigt werden. Dieser Vereinigungspunkt *F* der parallel mit der Axe einfallenden Strahlen führt den Namen des Hauptbrennpunktes.

Rückt der leuchtende Punkt aus unendlicher Entfernung näher, so entfernt sich der Vereinigungspunkt auf der anderen Seite von der Linse; ist der leuchtende Punkt in *T'*, Fig. 287, so ist der Vereinigungspunkt in *T*; rückt der leuchtende Punkt noch näher, bis *R*, so ist der Vereinigungspunkt in *S*; nähert er sich der Linse so, daß er in der Mitte zwischen derselben und *R* steht, nähert er sich also bis auf die Brennweite, so laufen die Strahlen nach ihrem Durchgange durch die Linse mit der Axe parallel.

Die Brennweite, d. h. die Entfernung des Brennpunktes *F* von der Linse, hängt nicht allein von ihrer Gestalt, sondern auch von dem Brechungsexponenten der Substanz ab, aus welcher sie gefertigt ist.

Für eine biconvexe Glaslinse, deren Flächen beide einen gleichen Halbmesser haben, fallen die Brennpunkte zu beiden Seiten mit den Mittelpunkten der Kugelsegmente zusammen, vorausgesetzt, daß der Brechungsexponent der Glassorte gerade $^3/_2$ ist.

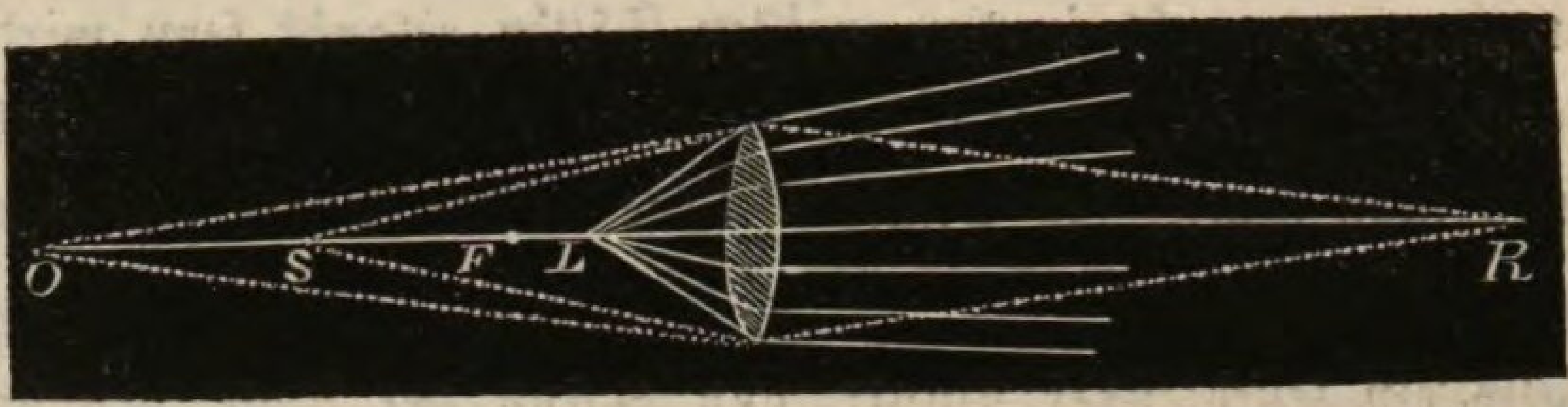
Ist der Brechungsexponent der Linse größer, so liegt der Brennpunkt der Linse näher; ist er aber kleiner, so liegt er weiter von derselben entfernt.

Was von biconvexen Linsen gesagt wurde, gilt auch von convexen Menisken und planconvexen Gläsern, d. h. sie haben einen Hauptbrennpunkt, in welchem alle von der anderen Seite her parallel mit der Axe einfallenden Strahlen concentrirt werden; die Strahlen, welche von einem auf der Axe liegenden Punkte ausgehen, welcher um die doppelte Brennweite von dem Glase absteht, werden auf der anderen Seite in einem Punkte vereinigt, welcher ebenfalls um die doppelte Brennweite von dem Glase absteht.

Für eine planconvexe Linse, deren Brechungsexponent $^3/_2$ ist, steht der Brennpunkt um den doppelten Radius der gekrümmten Fläche von der Linse ab.

Wenn der leuchtende Punkt *L*, Fig. 289, der Linse so nahe rückt, daß er

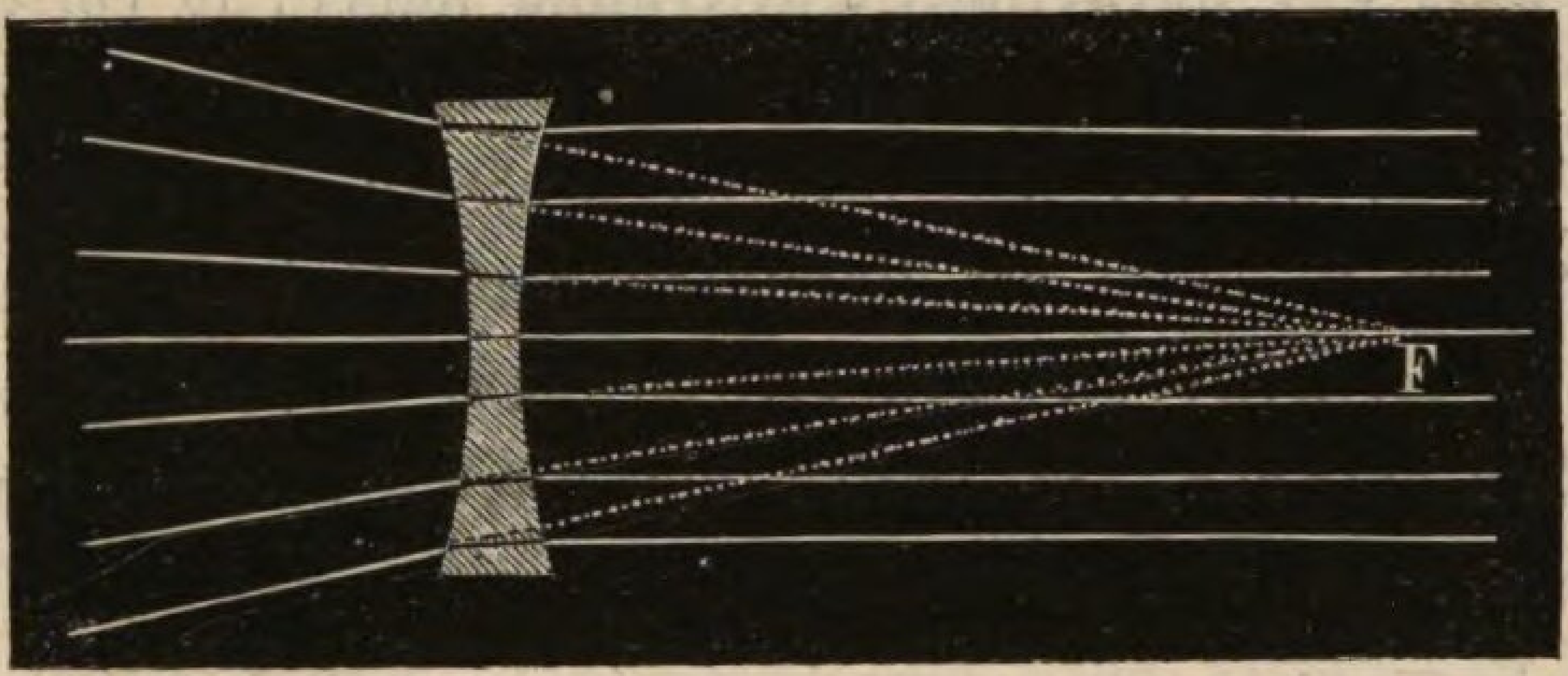
Fig. 289.



noch innerhalb der Brennweite liegt, so ist der Strahlenkegel, welcher die Linse trifft, so stark divergirend, daß die Linse nicht mehr im Stande ist, die Strahlen convergent oder auch nur parallel zu machen, sie divergiren aber nach dem Durchgange durch die Linse weniger als vorher, sie verbreiten sich so, als ob sie von einem Punkt *O* herkämen, welcher weiter von dem Glase absteht als der leuchtende Punkt.

Aehnliche Betrachtungen lassen sich auch für Hohlgläser anstellen. Wenn die einfallenden Strahlen parallel sind, so divergiren die austretenden so, als kämen sie vom Hauptzerstreuungspunkte *F*, Fig. 290; rückt aber der leuchtende Punkt näher, sind also schon die auffallenden Strahlen divergirend, so werden sie nach dem Durchgange durch das Glas noch stärker divergiren als es für die parallel eintretenden Strahlen der Fall war, der

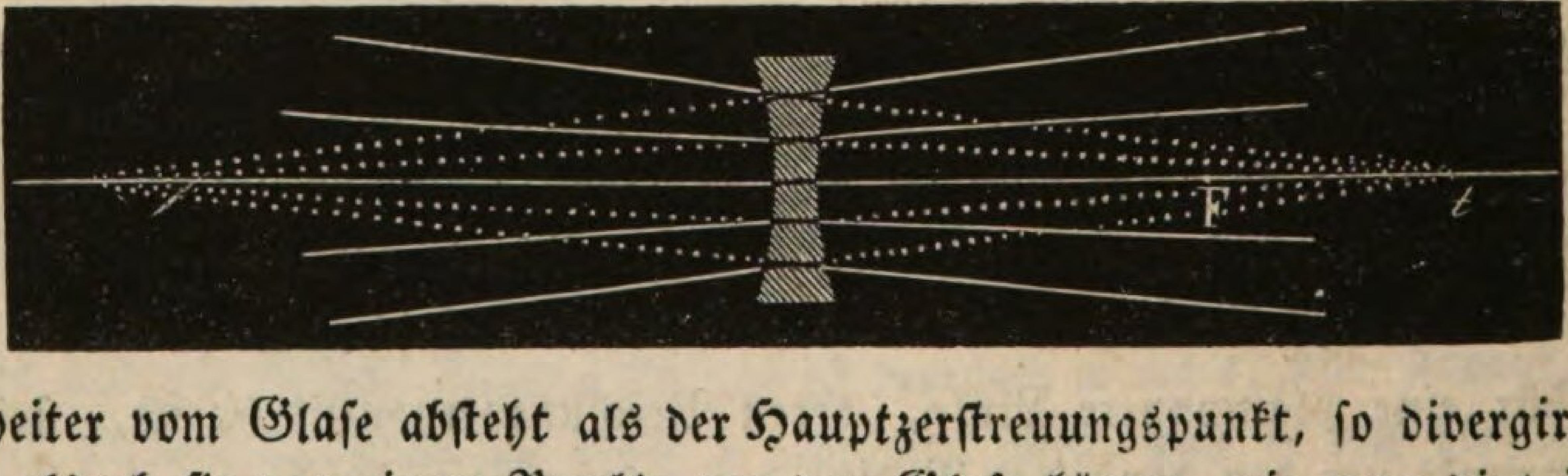
Fig. 290.



Zerstreuungspunkt rückt also um so mehr dem Glase näher, als der leuchtende Punkt näher kommt.

Es ist jetzt noch der Fall zu betrachten, daß die auffallenden Strahlen convergent sind. Wenn die einfallenden Strahlen nach dem Hauptzerstreuungspunkte *F* auf der anderen Seite des Glases hin convergiren, so werden die gebrochenen Strahlen nothwendig einander parallel austreten; es ist dies die Umkehrung des in Fig. 290 dargestellten Falles. Convergiren die einfallenden Strahlen stärker, so werden sie auch nach der Brechung noch convergiren; wenn aber die einfallenden Strahlen nach einem Punkte *t*, Fig. 291, convergiren,

Fig. 291.



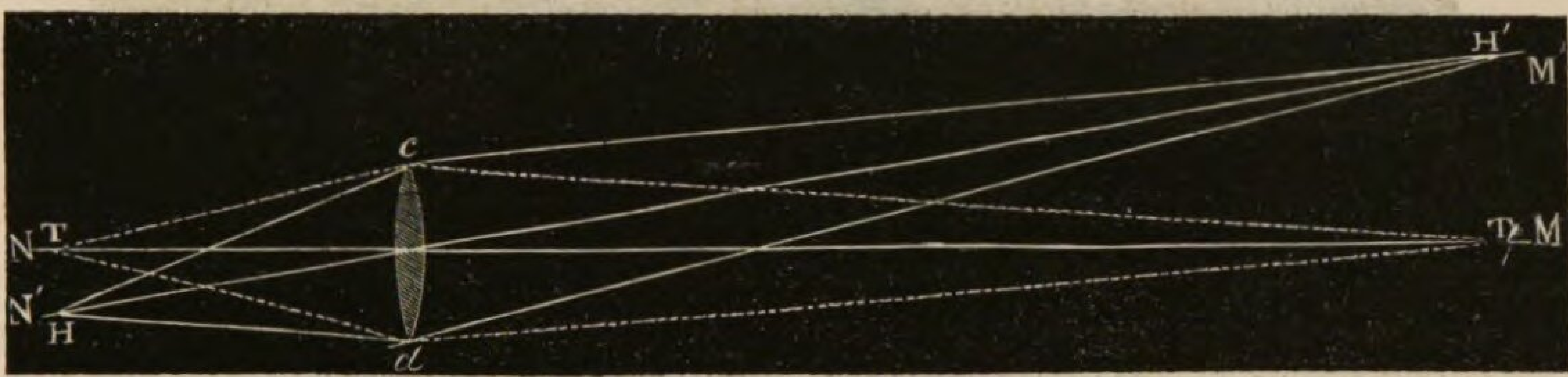
der weiter vom Glase absteht als der Hauptzerstreuungspunkt, so divergiren sie noch, als ob sie von einem Punkte vor dem Glase kämen, wie man dies in der

Figur sieht. Die Betrachtung dieses letzteren Falles ist für das Verständniß des Galiläischen Fernrohrs, wovon bald die Rede seyn wird, wichtig.

Secundäre Axen. Bisher haben wir nur solche leuchtende Punkte be- 120
trachtet, welche auf der Axe der Linse selbst liegen, es bleibt jetzt noch zu zeigen, daß das Gesagte auch für solche Punkte gilt, welche nicht auf der Hauptaxe liegen, vorausgesetzt, daß die Nebenaxen (secundäre Axen) nur einen kleinen Winkel mit der Hauptaxe machen. Mit dem Namen der Nebenaxe bezeichnet man die Linie, welche man sich von einem nicht auf der Hauptaxe liegenden Punkte durch die Mitte der Linse gezogen denken kann.

In Fig. 292 sey *H* ein nicht auf der Hauptaxe liegender leuchtender Punkt, so werden alle von ihm ausgehenden Lichtstrahlen in einem Punkte *H'* vereinigt

Fig. 292.



werden, welcher auf der Nebenaxe *M' N'* eben so weit von der Linse absteht wie der Vereinigungspunkt *T'* der Strahlen, welche von einem Punkte *T* ausgehen, welcher, auf der Hauptaxe liegend, eben so weit von der Linse entfernt ist wie *H*.

Es ist dies leicht zu beweisen. Der mittlere Strahl *HM'* geht ungebrochen durch die Linse hindurch; ferner ist $Hc = Tc$ und Winkel $cTM = cHM'$ (wenn auch nicht ganz genau, doch nahe); da der Strahl Tc in c ebenso stark abgelenkt wird, wie Hc, so ist noch Winkel $HcH' = TcT'$, folglich ist das Dreieck HcH' = Dreieck TcT', folglich $TT' = HH'$, H' ist also ebenso weit von der Linie entfernt wie T.

Dasselbe ergiebt sich auch aus der Vergleichung der Dreiecke TdT' und HdH'.

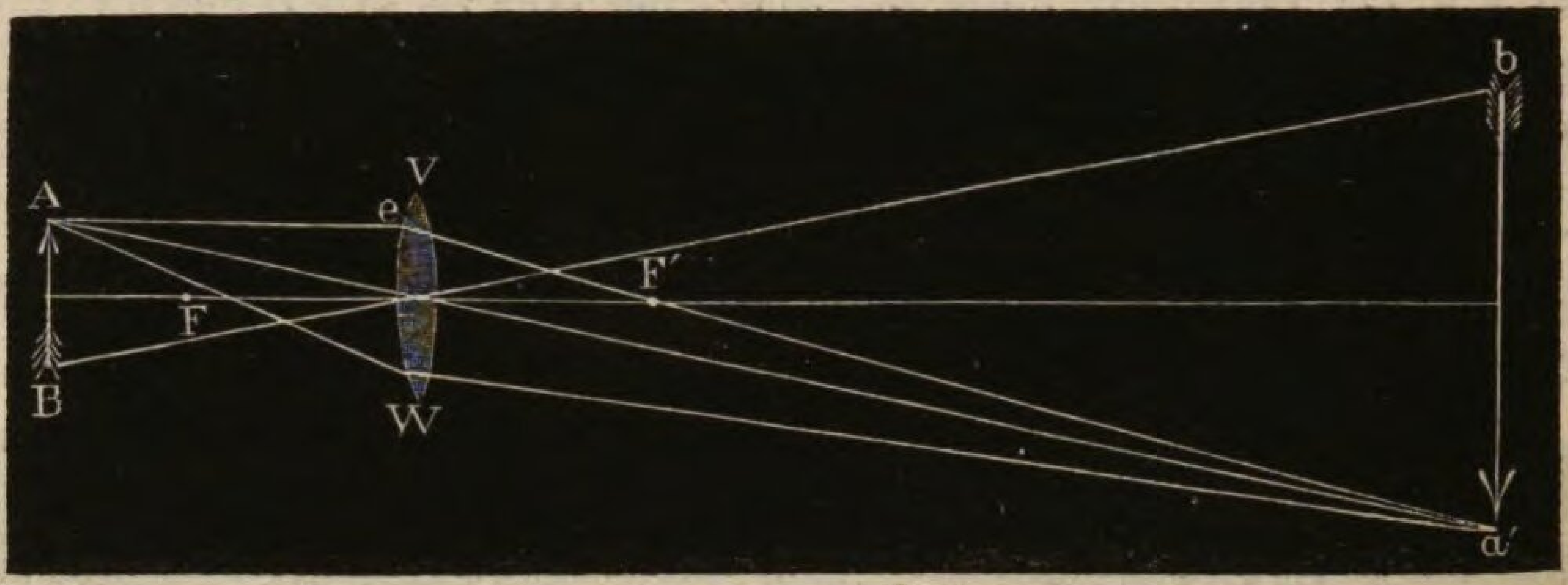
Das Feld einer Linse ist der Winkel, welchen zwei der Nebenaxen mit einander noch machen können, ohne daß die Voraussetzungen unseres Beweises merklich unrichtig werden.

Von den durch Linsen erzeugten Bildern. In Fig. 293 s. f. S., 121
sey *AB* ein Gegenstand, der sich auf der einen Seite von der Linse *VW* befindet, aber weiter von ihr absteht als der Brennpunkt *F*. Die von *A* ausgehenden Strahlen werden in einem Punkte *a* auf der von *A* durch die Mitte *o* der Linse gezogenen Nebenaxe vereinigt; *a* ist also das Bild von *A*; ebenso ist *b* das Bild von *B*, mithin ist auch *ab* das Bild des Gegenstandes von *AB*; das Bild ist in diesem Falle verkehrt und ist ein wahres Sammelbild.

Von der Mitte der Linse aus gesehen, erscheinen Bild und Gegenstand unter gleichem Winkel, denn der Winkel *boa* ist dem Winkel *BoA* als seinem

Scheitelwinkel gleich; ob nun das Bild oder der Gegenstand größer ist, hängt demnach davon ab, ob Bild oder Gegenstand am weitesten vom Glase entfernt sind. Nehmen wir an, der Gegenstand liege um die doppelte Brennweite von dem Glase entfernt, so wird das Bild auf der anderen Seite in gleicher Entfernung entstehen; in diesem Falle ist also Bild und Gegenstand gleich groß.

Fig. 293.



Rückt der Gegenstand dem Glase näher, so entfernt sich das Bild, es wird also größer. Von solchen Gegenständen also, die um mehr als die Brennweite, aber weniger als die doppelte Brennweite von dem Glase abstehen, erhält man verkehrte vergrößerte Bilder; so ist in unserer Figur das Bild *ab* größer als der Gegenstand *AB*.

Wenn der Gegenstand weiter vom Glase entfernt ist als die doppelte Brennweite, so liegt das Bild näher; von entfernten Gegenständen erhält man also verkehrte verkleinerte Bilder. Wäre *ab*, Fig. 293, ein solcher Gegenstand, der um mehr als die doppelte Brennweite vom Glase absteht, so würde man das verkleinerte Bild *AB* erhalten.

Nennen wir g die Größe des Gegenstandes, g' die des Bildes, b die Entfernung des Gegenstandes und m die Entfernung des Bildes vom Glase, so ist

$$g : g' = b : m,$$

d. h. Bild und Gegenstand verhalten sich wie ihre Entfernungen von der Linse.

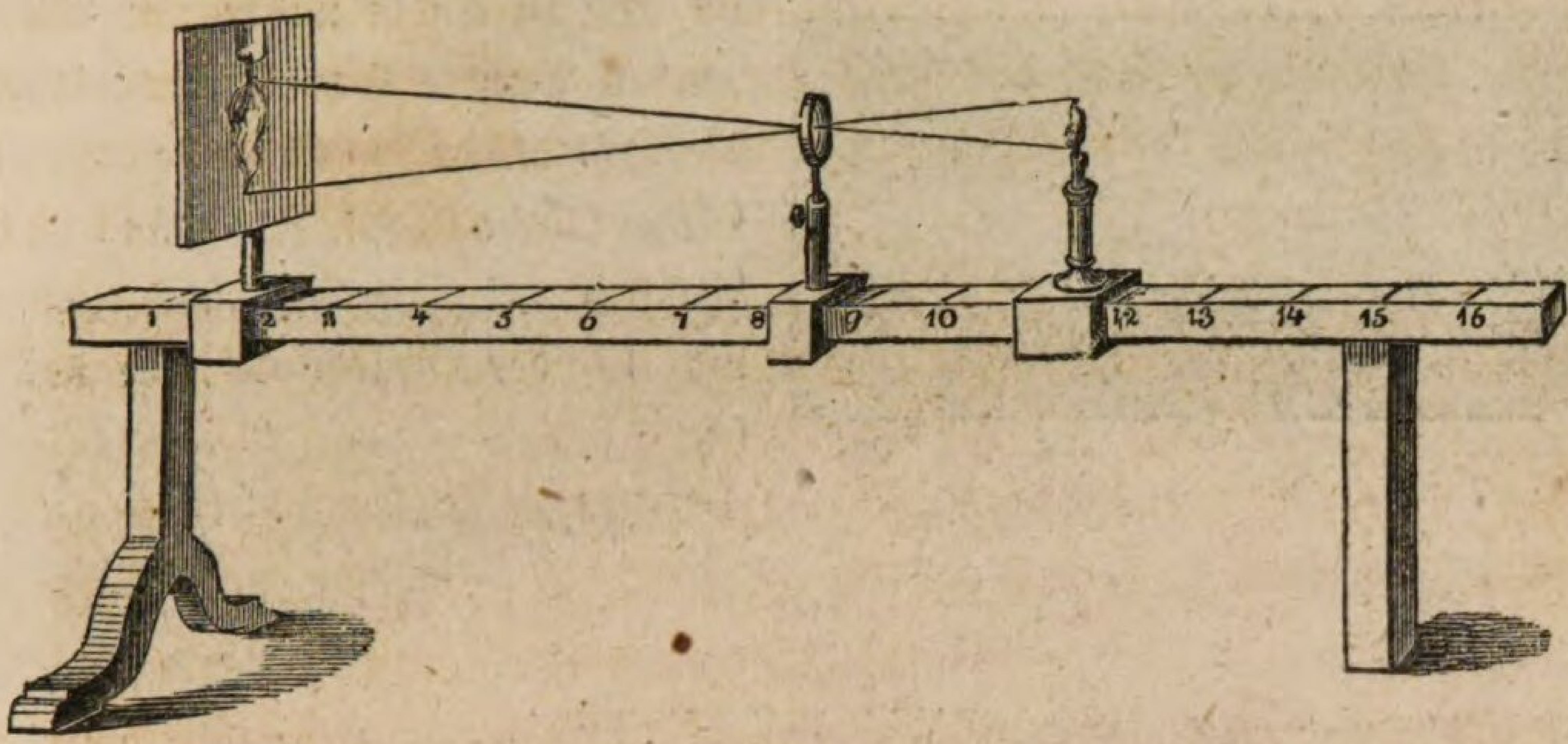
Bei einer Linse von kurzer Brennweite liegen die Bilder entfernter Gegenstände näher am Glase, als bei einer solchen von größerer Brennweite; von entfernten Gegenständen geben also die Linsen um so kleinere Bilder, je kürzer ihre Brennweite ist; umgekehrt ist für den Fall, daß die Linse vergrößerte Bilder kleiner Gegenstände giebt, welche sich in der Nähe ihres Brennpunktes befinden, bei gleicher Entfernung des Bildes von der Linse das Bild derjenigen Linsen das größere, welche eine geringere Brennweite haben, weil bei dieser der Gegenstand näher an die Linse heranrückt.

Fig. 294 zeigt, wie man die eben besprochenen Gesetze der durch Linsengläser erzeugten Sammelbilder durch den Versuch bestätigen kann.

Wenn der Gegenstand noch innerhalb der Brennweite der Linse sich befindet, so kann kein Sammelbild von ihm entstehen, weil die Strahlen, welche von einem leuchtenden Punkte ausgehen, der dem Glase näher liegt als der

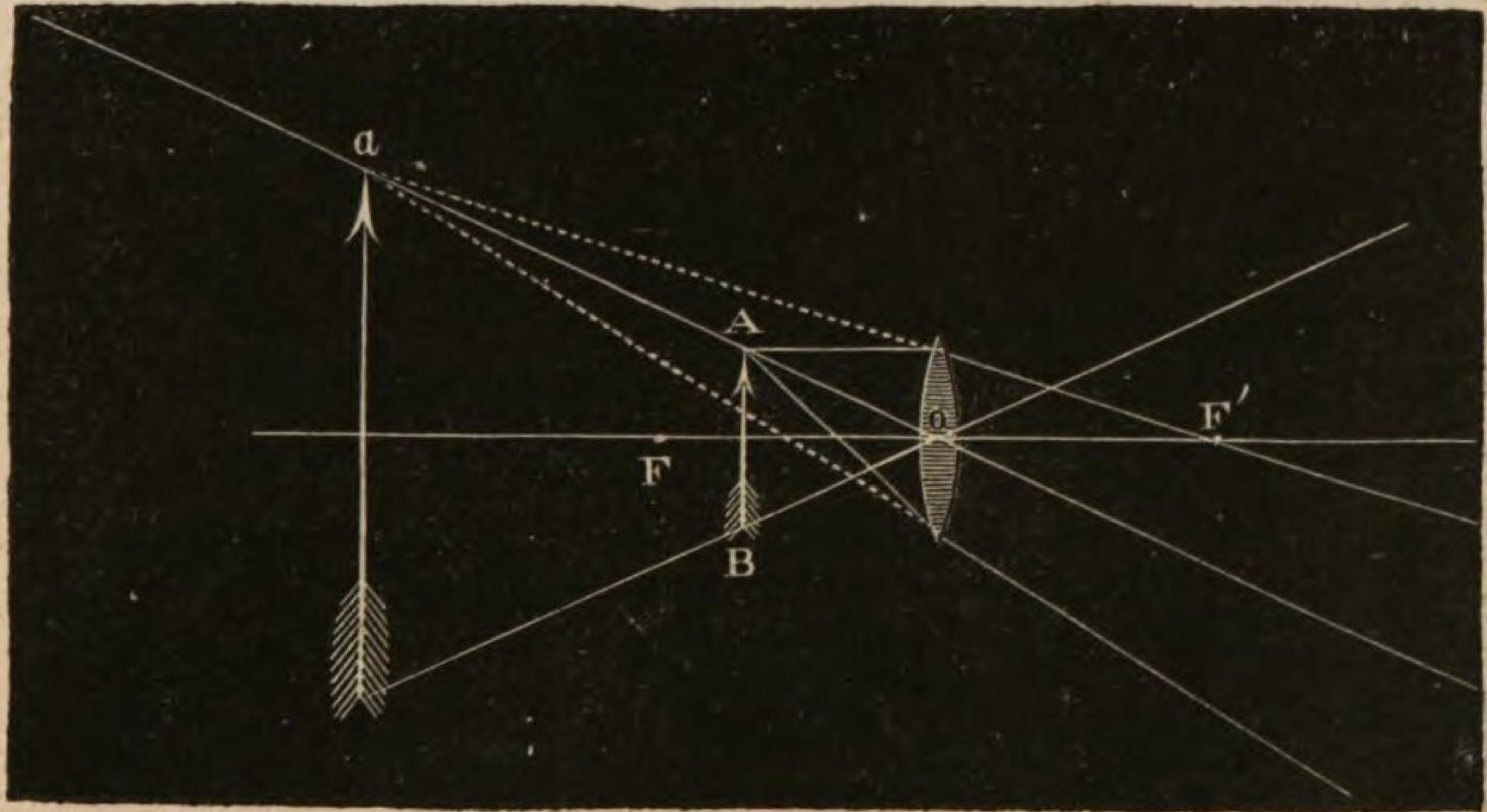
Brennpunkt, nach ihrem Durchgange durch das Glas immer noch divergiren.

Fig. 294.



In Fig. 295 sey *AB* ein solcher innerhalb der Brennweite sich befindender Gegenstand, so divergiren die von *A* ausgehenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch das Glas, als ob sie von *a* kämen. Die Entfernung des Punktes *a* vom Glase kann man nach den oben angegebenen Constructionen leicht finden. Die von *B* ausgehenden Strahlen divergiren nach dem Durchgange durch die

Fig. 295.

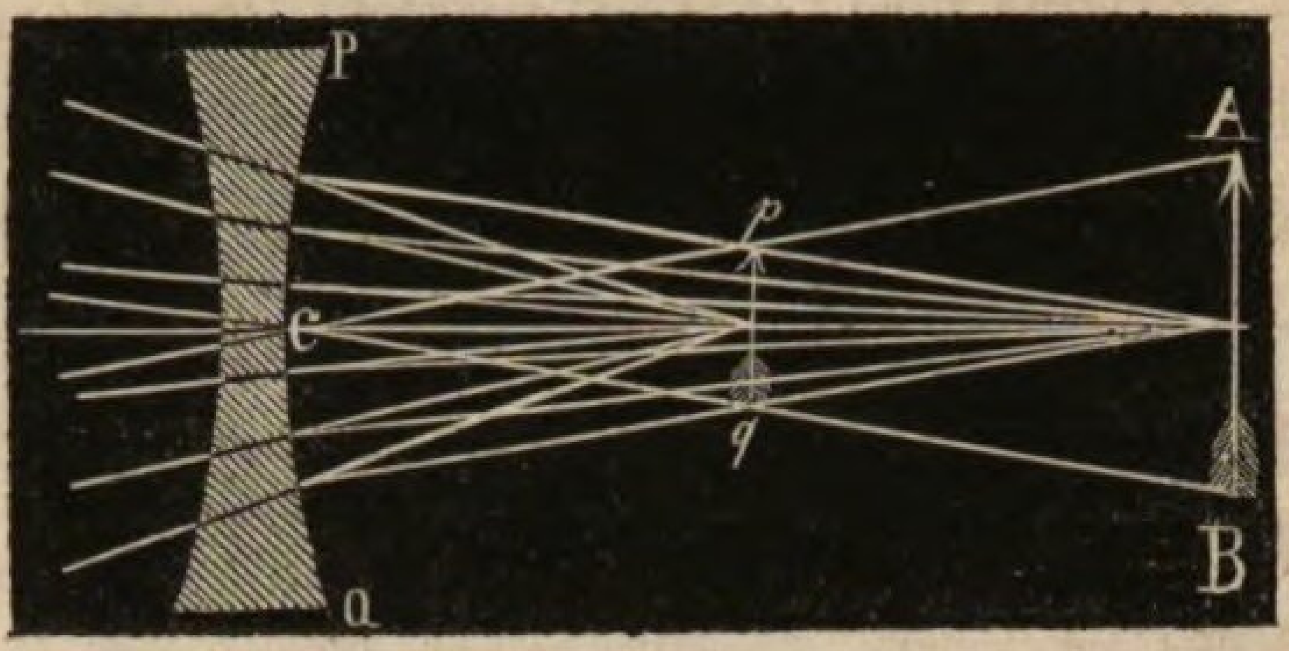


Linse so, als ob sie von *b* kämen; wenn nun ein Auge sich auf der anderen Seite des Glases befindet, so wird es von den Lichtstrahlen, die von dem Gegenstande *AB* ausgehen, so getroffen, als ob sie von *ab* kämen; *ab* ist also das Bild von *AB*. Da Gegenstand und Bild innerhalb desselben Winkels *aob* liegen, der Gegenstand aber dem Glase näher liegt, so ist offenbar das Bild in diesem Falle größer als der Gegenstand. Wenn man eine Linse als Lupe anwendet, um kleinere Gegenstände dadurch zu betrachten, so ist es das auf diese Weise vergrößerte Bild, welches man sieht. Wir werden darauf später noch zurückkommen.

Die Hohlgläser geben keine Sammelbilder, sondern nur Bilder der Art, wie sie bei Convexlinsen entstehen, wenn der Gegenstand sich innerhalb der Brenn-

weite befindet. Da nun eine Hohllinse die Strahlen, welche von einem Punkte ausgehen, noch divergenter macht, als ob sie von einem näher am Glase liegenden Punkte kämen, so ist klar, daß die Hohlgläser verkleinerte Bilder der Gegenstände zeigen, wie man leicht beim Anblicke der Fig. 296 übersehen wird, wo *AB* der Gegenstand, *pq* das Bild ist.

Fig. 296.



Drittes Kapitel.

Zerlegung des weißen Lichts.

122 **Das weiße Sonnenlicht ist aus verschieden gefärbten Strahlen zusammengesetzt.** Um dies zu beweisen, braucht man nur auf die schon oben angegebene Weise ein Sonnenspectrum zu bilden. Wenn durch eine kleine runde Oeffnung im Laden eines dunklen Zimmers ein Bündel Sonnenstrahlen *bd*, Fig. 297, in ein finstres Zimmer eintritt, so wird auf der der Oeffnung gegenüberstehenden Wand ein runder weißer Fleck erscheinen; fängt man aber das Strahlenbündel durch ein Prisma *s* auf, so erhält man das in die Länge gezogene gefärbte Bild *rv*. Fig. 298 zeigt die Erscheinung, wie man sie auf der Wand beobachtet.

Fig. 297.

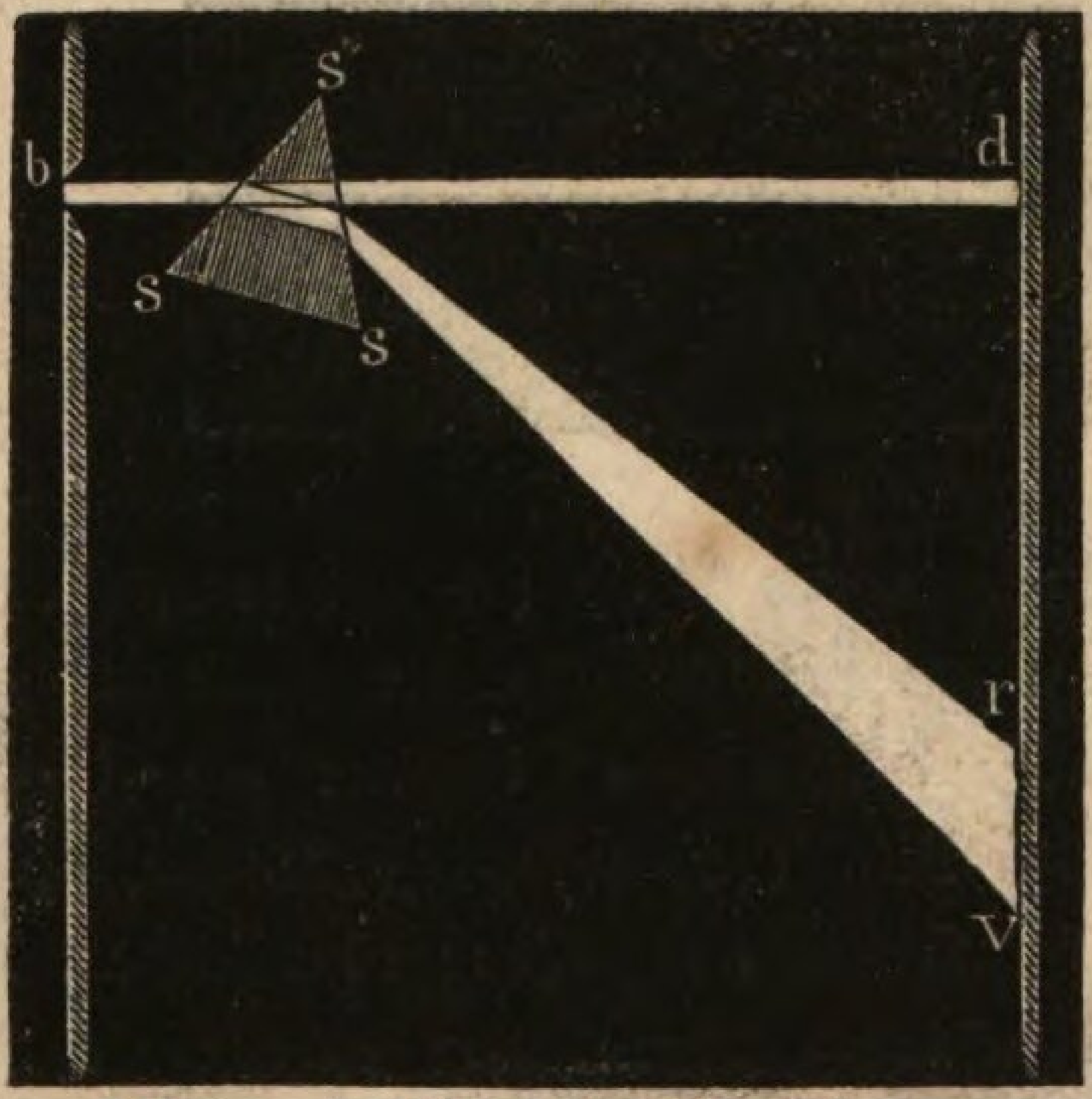


Fig. 298.



Dieses farbige in die Länge gezogene Sonnenbild wird das Spectrum genannt.

Die Länge des Spectrums ist unter sonst gleichen Umständen um so größer, je größer der brechende Winkel des Prismas ist. Auch von der Substanz, aus welcher das Prisma besteht, hängt die Länge des Spectrums ab.

Bei dem in Fig. 297 angedeuteten Versuche wird man bald sehen, daß sich in der Mitte des Spectrums ein weißer Streifen bildet, wenn die Länge desselben nicht wenigstens doppelt so groß ist als seine Breite; wenn aber das Spectrum sehr in die Länge gezogen ist, so verschwindet das Weiß vollständig, und man unterscheidet im Spectrum sieben Hauptfarben in folgender Ordnung: Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violet.

Diese Farben werden die Regenbogenfarben, prismatische Farben oder auch einfache Farben genannt. Wir werden bald sehen, daß es eigentlich unzählig viele verschiedene Farben im Spectrum giebt, daß aber unter diesen das Auge sieben Hauptnüancen unterscheidet.

Das rothe Ende des Spectrums ist jederzeit der Stelle zugekehrt, an welcher das runde weiße Sonnenbild *d*, Fig. 298, erscheinen würde, wenn das Prisma nicht da gewesen wäre; die rothen Strahlen haben also die geringste Ablenkung erfahren.

Wenn die Oeffnung im Laden eine Spalte von 1 bis 2 Millimeter Breite ist, welche der Axe des Prismas parallel steht, wenn der brechende Winkel des Prismas 60° ist und man das Spectrum in einer Entfernung von 2 bis 3 Metern auffängt, so erhält man schon eine recht vollständige Trennung der Farben, d. h. das Spectrum wird überall lebhaft gefärbt erscheinen und kein Weiß mehr in der Mitte zeigen.

Um das prismatische Farbenbild zu sehen, ist es nicht nöthig, daß man durch ein Prisma ein Sonnenspectrum auf einer weißen Wand hervorbringt, man braucht nur durch ein Prisma nach einem schmalen hellen Gegenstande hinzusehen. Betrachtet man z. B. eine Kerzenflamme durch ein vertikal gehaltenes Prisma, so erscheint sie bedeutend in die Breite gezogen und auf die erwähnte Weise gefärbt. Wenn man in den Laden eine kleine Oeffnung von ungefähr 1 Centimeter Durchmesser einschneidet, so sieht man durch diese Oeffnung den hellen Himmel, also eine helle Scheibe auf dunklem Grunde. Betrachtet man nun diese Scheibe durch das Prisma, so sieht man statt des weißen Kreises ein sehr in die Länge gezogenes farbiges Bild, von welchem Alles gilt, was oben von dem an die Wand geworfenen Spectrum gesagt wurde.

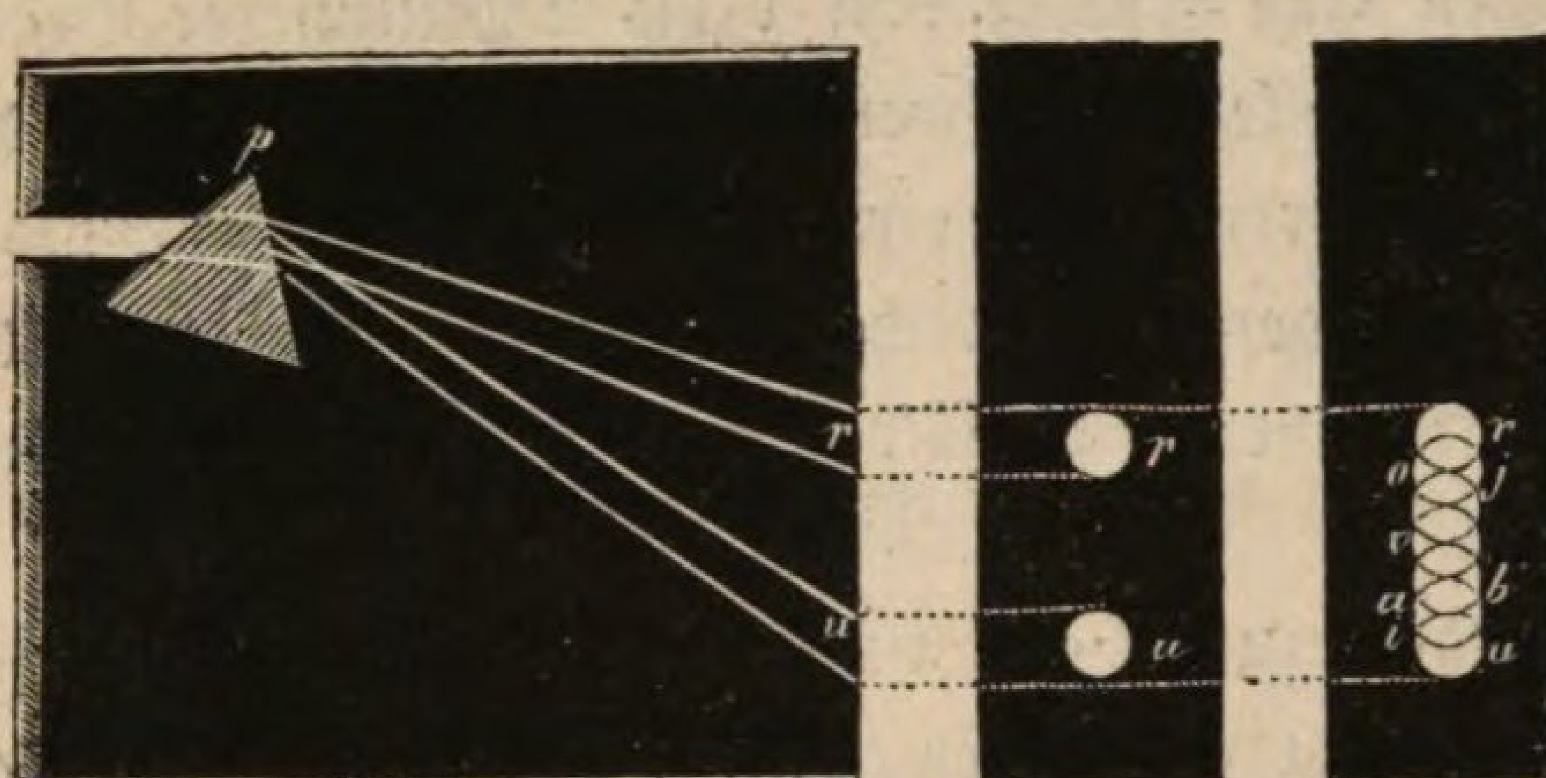
Die verschiedenfarbigen Lichtstrahlen sind ungleich brechbar. 123
Dieser Satz geht schon daraus hervor, daß das weiße Licht durch ein Prisma in verschiedenfarbige Strahlen zerlegt wird; die rothen Strahlen bilden mit den violeten nach dem Durchgange durch das Prisma einen Winkel, sie divergiren, und zwar sind die violeten Strahlen mehr von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt als die rothen. Die violeten Strahlen sind unter allen die am stärksten brechbaren, die rothen sind es am wenigsten. Die grünen Strahlen sind stärker brechbar als die rothen und weniger als die violeten, weil im Spectrum das Grün zwischen Roth und Violet liegt.

Denken wir uns für einen Augenblick, daß das weiße Licht nur rothe und violete Strahlen enthielte, so ist klar, daß man statt des Spectrums nur zwei

runde, von einander getrennte Sonnenbilder erhalten würde, von denen das eine roth, das andere violet ist. Man kann in der That solche getrennte Bilder sichtbar machen; manche Körper nämlich haben die Eigenschaft, nicht alle farbigen Strahlen gleich gut durchzulassen, gewisse Strahlen also zu absorbiren. Dahin gehören farbige Gläser, farbige Flüssigkeiten u. s. w. Füllt man z. B. eine Auflösung von schwefelsaurem Indigo zwischen parallele Glasplatten und sieht man durch diese Lösung und ein Prisma nach einer Kerzenflamme, so erblickt man zwei getrennte Bilder derselben, nämlich ein rothes und ein blaues. Dasselbe Resultat erhält man, wenn man statt der Indigolösung ein Stückchen dunkelblaues Glas anwendet.

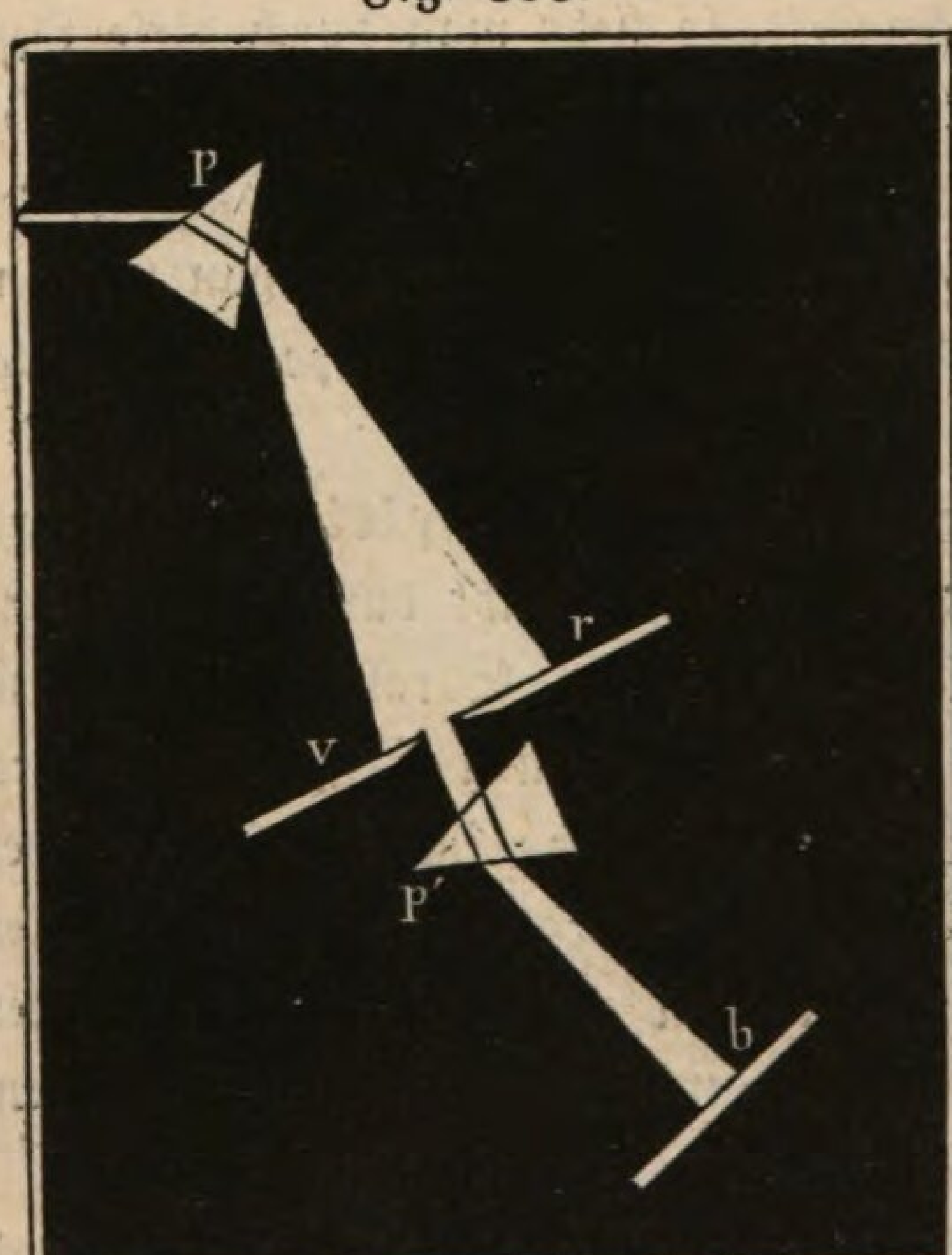
Das ganze Spectrum besteht aus einer Reihe auf einander folgender Bilder, welche theilweise über einander fallen. Je kleiner die Oeffnung ist, von welcher die weißen Strahlen auf das Prisma fallen, desto kleiner werden die einzelnen Bilder, während doch die Mittelpunkte der einzelnen farbigen Bilder nicht näher rücken, die verschiedenen Farben fallen also weniger über einander; je kleiner die Oeffnung ist, desto reiner werden also auch die einzelnen Farben erscheinen.

Fig. 299.



Jede Farbe ist einfach, wenn sie sich auf keine Weise weiter in andere Farben zerlegen läßt; wir wollen nun zeigen, daß diese Eigenschaft wirklich den prismatischen Farben zukommt.

Fig. 300.

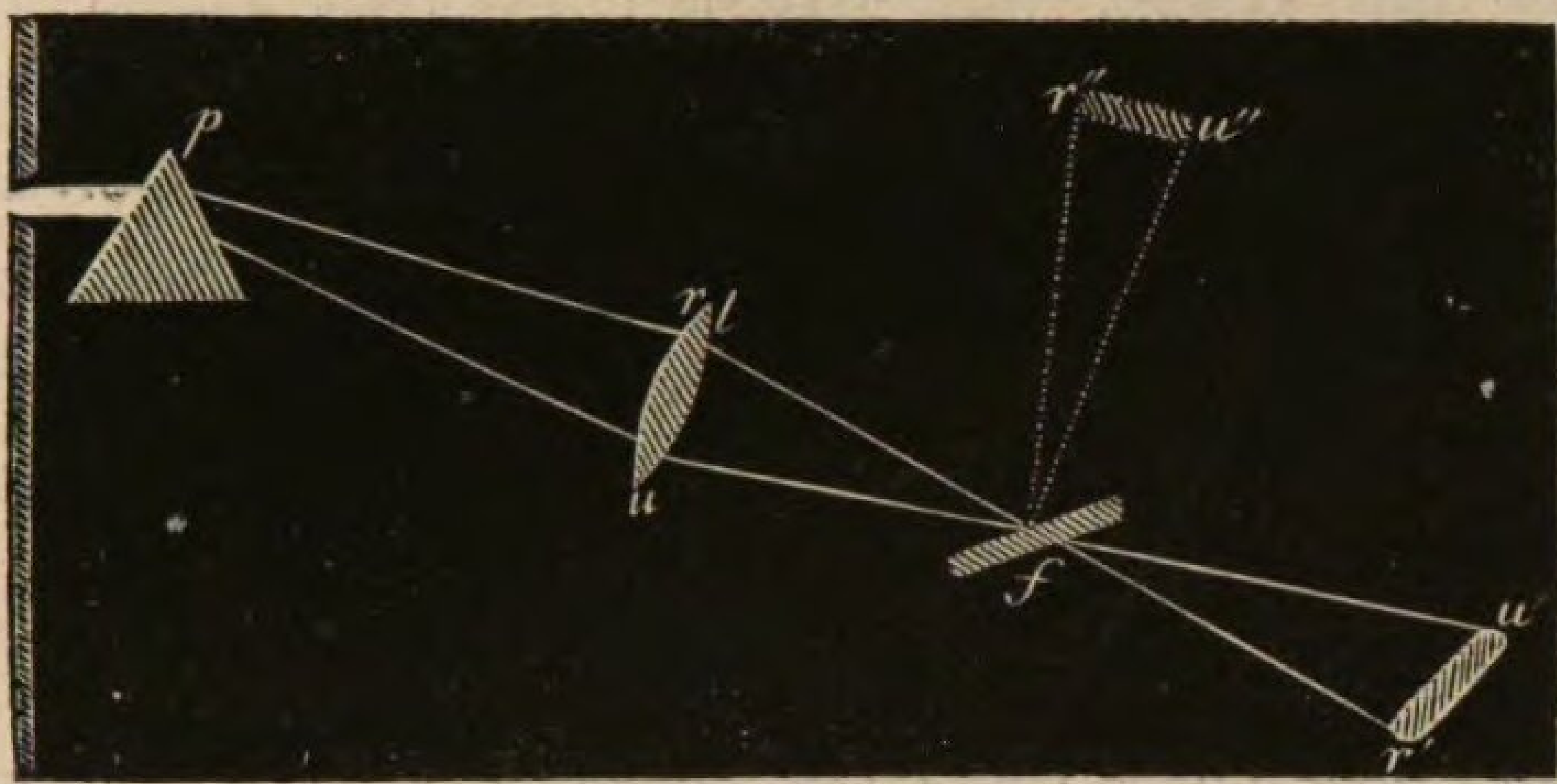


Wenn man ein Spectrum auf einer Wand auffängt, an einer bestimmten Stelle derselben, etwa da, wo die blauen Strahlen auffallen, ein Loch macht, so werden alle Farben aufgefangen, und nur ein farbiger Strahl geht durch die Oeffnung hindurch; dieser Strahl nun läßt sich auf keinerlei Weise weiter zerlegen; wenn man ihn auch abermals durch ein Prisma gehen läßt, so bleibt die Farbe doch unverändert.

Nach Newton nennt man das einfache Licht auch homogenes Licht.

Aus den einfachen Farben des Spectrums läßt sich das weiße Licht wieder zusammensetzen. 124
Wenn man das Spectrum mit einer Linse *l* auffängt, so werden die verschiedenfarbigen Strahlen durch dieselbe in einem Punkte *f* vereinigt, und wenn man hier das Sonnenbild auf einem mattgeschliffenen Glase oder auf einem Papierschirme auffängt, so erscheint es wieder blendend weiß, obgleich verschiedenfarbige Strahlen auf die Linse auffielen. Hält man den Schirm nicht in den Punkt *f*, sondern weiter von der Linse weg, so erhält man wieder ein umgekehrtes Spectrum *r'u'*, ein Beweis, daß sich die verschiedenfarbigen Strahlen in *f* kreuzten, und wenn man in *f* einen Spiegel anbringt, so bilden die reflectirten Strahlen ebenfalls wieder ein Spectrum *u''r''*.

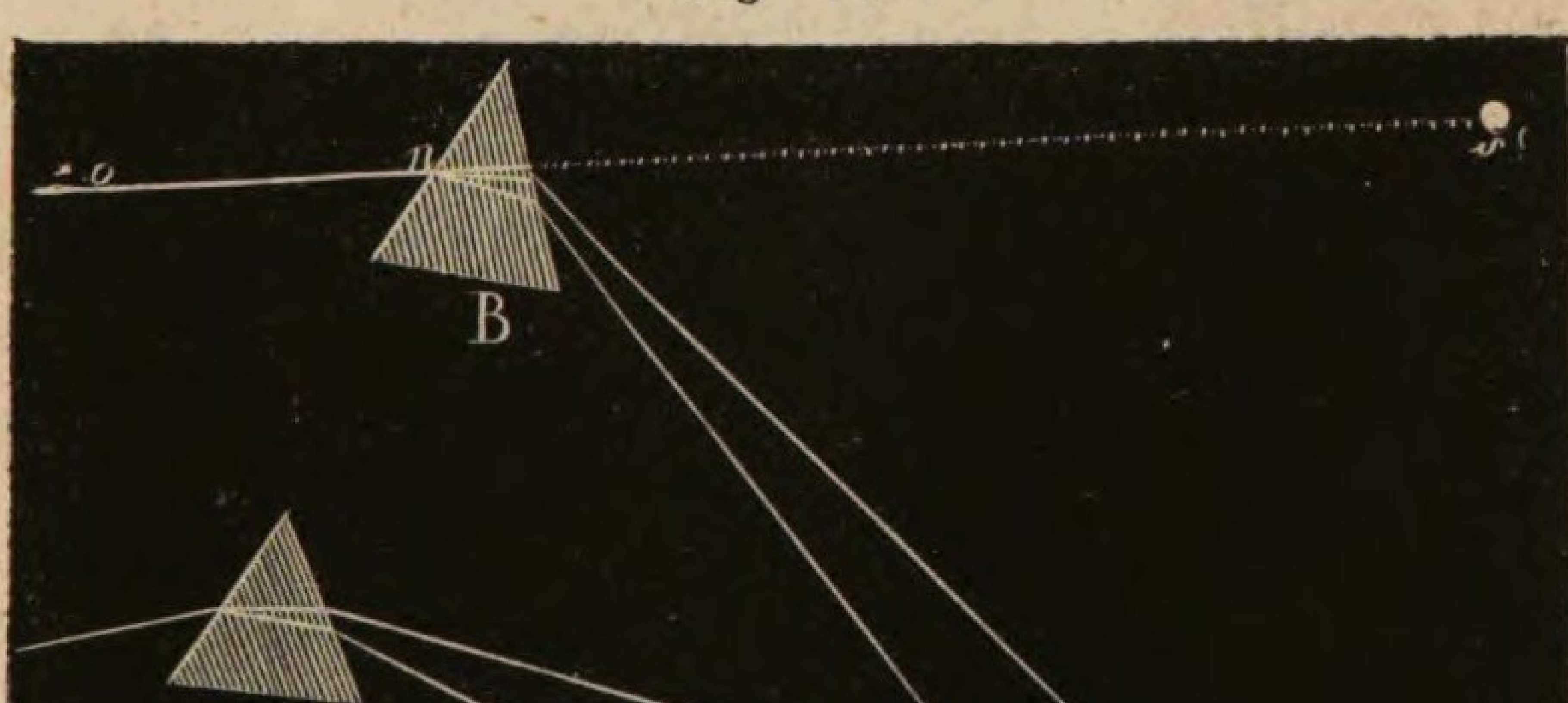
Fig. 301.



Man kann sich zu diesen Versuchen auch eines Sammelspiegels anstatt einer Linse bedienen.

Daß die prismatischen Farben zusammen weiß geben, geht aus dem sehr überraschenden, ebenfalls von **Newton** angegebenen Versuche hervor, daß das lange prismatische Farbenbild, durch ein zweites Prisma gesehen, unter den geeigneten Umständen wieder als eine vollkommen weiße und runde Scheibe erscheint. In Fig. 302 sey *rv* ein Spectrum, welches, durch das Prisma *A* erzeugt, auf einer weißen Wand aufgefangen ist. Wenn nun ein zweites Prisma *B* so aufgestellt wird, daß es dasselbe Spectrum *rv* an derselben Stelle erzeugen würde, wenn ein Sonnenstrahl in der Richtung *on* darauf fiele, so ist klar, daß auch die Strahlen, die von dem Spectrum auf dieses Prisma *B* fallen, sämmtlich in der Richtung *no* austreten werden; ein in *o* befindliches Auge muß also in der Richtung *ons* ein weißes Bild des farbigen Spectrums sehen. Die

Fig. 302.



Stellung, die man dem Prisma *B* geben muß, läßt sich leicht durch den Versuch ausmitteln.

Wenn man eine kreisförmige Scheibe in sieben Sectoren theilt und diese mit Farben bemalt, die den prismatischen möglichst ähnlich sind, so erscheint die Scheibe bei rascher Rotation nicht mehr farbig, sondern weißlich; sie würde vollkommen weiß erscheinen, wenn die Sectoren mit den reinen prismatischen Farben bemalt werden könnten, und wenn die Breite der einzelnen farbigen Sectoren genau in demselben Verhältnisse zu einander ständen wie die Breiten der entsprechenden Theile des Spectrums. Um nach demselben Principe mit reinen prismatischen Farben operiren zu können, brachte Münchow das Prisma mit einem Uhrwerke in Verbindung, um es in eine rasche oscillirende Bewegung versetzen zu können. Durch diese Bewegung des Prismas geht nun auch das auf einem Schirme aufgefangene Spectrum rasch hin und her, und da zeigt sich dann statt des farbigen Spectrums ein weißer Lichtstreif, der nur an den Enden noch etwas farbig erscheint. Das Auge empfängt nämlich von jedem Punkte des Schirms rasch auf einander die Eindrücke aller einzelnen Farben, die einzelnen Eindrücke verwischen sich und bringen so die Empfindung von Weiß hervor.

125 **Von den complementären Farben und den natürlichen Farben der Körper.** Da alle einfachen Farben, im richtigen Verhältnisse (d. h. in dem Verhältnisse, wie es das Spectrum giebt) vereinigt, weißes Licht bilden, so reicht es hin, eine oder mehrere der einfachen Farben zu unterdrücken oder nur ihr Verhältniß zu ändern, um aus Weiß irgend einen Farbenton zu machen. Unterdrückt man z. B. im weißen Licht das Roth des Spectrums, während alle anderen Farben ungeändert bleiben, so wird man eine bläuliche Färbung erhalten, der man nur wieder Roth hinzufügen darf, um das Weiß wieder herzustellen. Zwei Farbentöne, welche diese Bedingung erfüllen, d. h. welche zusammengenommen Weiß geben, heißen complementäre Farben. Jede Farbe hat auch ihre complementäre, denn wenn sie nicht weiß ist, so fehlen ihr gewisse Strahlen, um Weiß zu bilden, und diese fehlenden Strahlen zusammengenommen machen die complementäre Farbe aus. Violet, welches mehr oder weniger ins Rothe übergeht, ist die complementäre Farbe der verschiedenen grünen Farben. Wir haben oben gesehen, daß eine Lösung von schwefelsaurem Indigo, in ein Prisma gebracht, von einem weißen Gegenstande ein rothes und ein blaues Bild giebt. Das rothe Bild ist sehr scharf begränzt, das blaue nicht so, es geht etwas in Violet und auch etwas Weniges ins Grün über; es fehlt also dem von der Indigolösung durchgelassenen Lichte Gelb und Orange vollständig, dann fast alles Grün und etwas Violet. Diese fehlenden Farben zusammen geben aber offenbar eine Mischung, in welcher Gelb bedeutend vorherrscht; Gelb ist also complementär zu dem Blau der Indigosolution, wie denn überhaupt gelbe Farbentöne die complementären zu blauen sind. Je mehr das Blau in Grün übergeht, desto mehr wird das complementäre Gelb ins Roth übergehen.

Wir werden später noch öfters Gelegenheit haben, von den complementären Farben zu reden.

Das Prisma, welches uns gedient hat, um das Sonnenlicht zu zerlegen, dient uns auch, um die natürlichen Farben der Körper zu analysiren; man braucht nur von den zu untersuchenden farbigen Körpern schmale Streifen zu schneiden und diese durch das Prisma zu betrachten.

Fig. 303.



Man klebe auf ein schwarzes Papier eine Reihe farbiger Papierstreifchen, die ungefähr 1 Millimeter breit sind, ungefähr wie man in Fig. 303 sieht. 1 sey weiß, 2 gelb, 3 orange, 4 hochroth, 5 grün und 6 blau; man kann zu diesem Zwecke von solchen farbigen Papieren nehmen, wie sie von den Buchbindern zu den Titeln auf den Rücken der Bücher gebraucht werden, weil diese Papiere sehr gesättigte schöne Farben haben. Betrachtet man nun diese farbigen Streifen aus der Entfernung von ungefähr 1 Fuß durch ein Prisma, dessen Axe mit der Längenrichtung der Streifen parallel läuft, so erscheinen sie natürlich von ihrer Stelle verrückt, zugleich aber sind alle Farben in ihre Elementfarben zerlegt. Das weiße Papier giebt ein vollkommenes Spectrum mit allen Farben, vom äußersten Roth bis zum äußersten Violet. Das von dem gelben Papiere herrührende Farbenbild kommt dem vollkommenen Spectrum am nächsten. Roth, Orange, Gelb und Grün sind vorhanden, nur das untere blaue und violete Ende des Spectrums fehlt; der Farbe des gelben Papiers fehlt also nur noch Blau und Violet, um Weiß zu bilden. Das Farbenbild des Papierstücks Nro. 3 (orange) ist schon weit weniger vollständig; hier fehlen außer den violeten und blauen Strahlen auch noch die grünen. Am wenigsten ausgebreitet ist das Farbenbild des rothen Papiers Nro. 4, es zeigt außer Roth nur etwas Weniges Orange, das Roth dieses Papiers ist also fast reines prismatisches Roth. In den Farben der bisher betrachteten Papiere 1 bis 4 war Roth enthalten; die Gränzen dieser 4 Farbenbilder fallen also oben in eine gerade Linie zusammen, während sie unten treppenförmig abgestuft sind. Die Farben der Papiere 5 und 6 aber (grün und blau) enthalten nur sehr wenig Roth; deshalb fehlt das rothe Ende ihres Farbenbildes fast ganz, und daher kommt es auch, daß diese beiden Farbenbilder weit mehr abgelenkt erscheinen als das Bild des rothen Papiers Nro. 4.

Fig. 304.



Wenn man nicht ein schmales weißes Papier, sondern ein breites durch das Prisma betrachtet, so sieht man es in der Mitte weiß und nur an den Rändern farbig. Gesetzt, man betrachte den weißen Papierstreifen *ab*, Fig. 304, durch ein Prisma, dessen Axe rechtwinklig auf der Längenrichtung des Papiers steht, so werden

die verschiedenfarbigen Bilder des Streifens zum Theil über einander fallen. Das rothe Bild des Streifens erstrecke sich z. B. von *r* bis *r'*, das orange von *o* bis *o'*, das gelbe von *g* bis *g'* u. s. w., das violette endlich von *v* bis *v'*, so ist klar, daß zwischen *v* und *r'* Bilder von allen prismatischen Farben zusammenfallen; die ganze Stelle von *v* bis *r'* muß also weiß erscheinen.

Fig. 305.



Zwischen *r* und *o* ist nur rothes Licht, zwischen *o* und *g* Roth und Orange, zwischen *g* und *gr* Roth, Orange und Gelb; das rothe Ende des Bildes wird also in einen gelblichen Ton übergehen. Zu den drei erwähnten Farben kommt nun an der zunächst nach unten folgenden Stelle noch Grün, dann Blau u. s. w. Das obere Ende des Bildes ist also Roth und geht allmälig durch Gelb in Weiß über.

Das andere Ende des Bildes ist violett und geht durch Blau in Weiß über.

Was hier von dem weißen Papierstreifen gesagt ist, gilt von jedem weißen Gegenstande von bedeutenderer Ausdehnung, den man durch ein Prisma betrachtet, er erscheint nur an den Rändern gefärbt.

Ein breiter schwarzer Streifen auf weißem Grunde bietet, durch ein Prisma betrachtet, gerade die umgekehrten Erscheinungen dar, das prismatische Bild erscheint nämlich an dem Ende, welches am wenigsten abgelenkt ist, mit einem violetten und blauen Saum, am anderen Ende aber mit einem rothen und gelben. Um diese Umkehrung zu erklären, braucht man nur zu bedenken, daß die Farben nicht von den schwarzen Streifen selbst, sondern von den weißen Räumen herrühren, die ihn begränzen. Wenn der schwarze Streifen selbst sehr schmal ist, so verschwindet im Bilde das Schwarz in der Mitte vollständig.

126 **Von der zerstreuenden Kraft verschiedener Substanzen.** Das Auseinanderfahren der verschiedenfarbigen Lichtstrahlen, welches durch ein Prisma bewirkt wird, wird mit dem Namen der Farbenzerstreuung oder der Dispersion bezeichnet. Die zerstreuende Kraft einer Substanz ist um so größer, je größer die Differenz zwischen den Brechungsexponenten der rothen und violetten Strahlen ist.

Für Wasser ist der Brechungsexponent der rothen Strahlen 1,330, der Brechungsexponent der violetten Strahlen aber ist 1,344, die Differenz dieser beiden Brechungsexponenten ist also 0,014.

Für Flintglas sind die Brechungsexponenten der rothen und violetten Strahlen 1,628 und 1,671, die Differenz ist also 0,043; sie ist dreimal so groß als beim Wasser.

Wenn man also ein Wasserprisma macht, welches, gehörig aufgestellt, die rothen Strahlen eben so weit ablenkt als ein Flintglasprisma, so wird doch das Spectrum des Flintglasprismas dreimal so breit seyn als das Spectrum

des Wasserprismas; die zerstreuende Kraft des Flintglases ist dreimal so groß als die zerstreuende Kraft des Wassers.

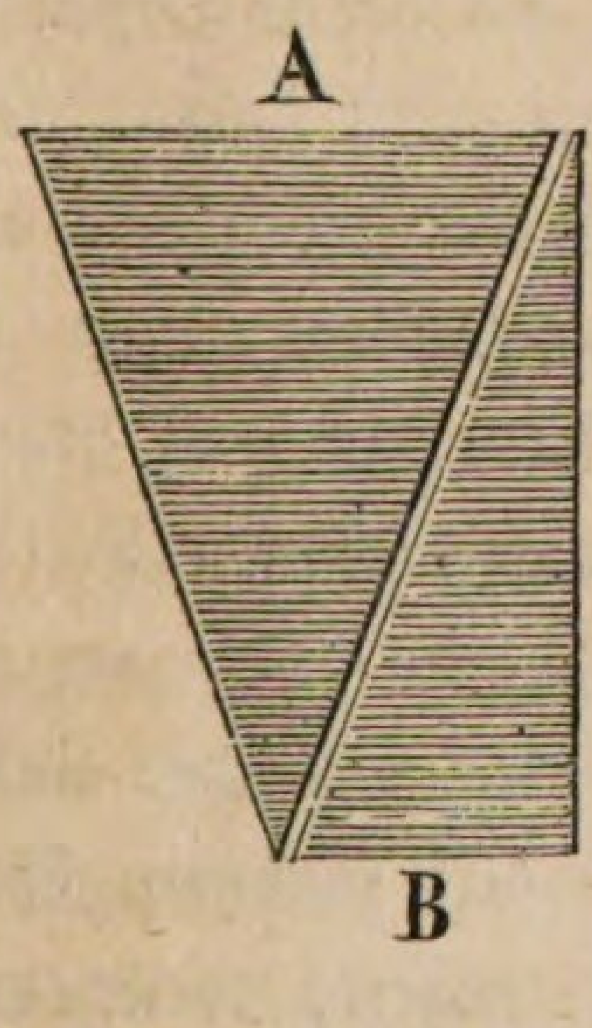
Für Crownglas ist die Differenz zwischen den Brechungsexponenten der rothen und violetten Strahlen ungefähr nur halb so groß als für Flintglas, die zerstreuende Kraft des Flintglases ist also doppelt so groß als die des Crownglases, obgleich die Brechungsexponenten beider Glassorten sehr nahe gleich sind.

Achromatische Prismen und Linsen. Man nennt Prismen 127
achromatisch, wenn sie die Eigenschaft haben, die Lichtstrahlen abzulenken, ohne sie zugleich in Farben zu zerlegen; achromatische Linsen solche, für welche die Brennpunkte der verschiedenfarbigen Strahlen genau zusammenfallen, welche die Gegenstände frei von allen farbigen Rändern zeigen. Man hielt lange Zeit den Achromatismus für unmöglich, d. h. man glaubte, daß das Licht ohne Zersetzung nicht abgelenkt werden könnte. Newton selbst hatte diese Ansicht, weil er glaubte, daß die Dispersion stets der brechenden Kraft der Körper proportional sey.

In der That hatte aber Hell schon im Jahre 1733 wirkliche achromatische Fernröhren construirt, allein er publicirte seine Erfindung nicht; Dollond machte sie ebenfalls im Jahre 1757 und veröffentlichte sie. Dollond's Entdeckung war ohne Zweifel für die Astronomie ein Ereigniß von der höchsten Wichtigkeit; um ihm aber seine volle Bedeutung zu geben, mußte erst noch die mathematische Theorie des Achromatismus entwickelt werden, ohne welche die nöthigen Verbesserungen in der Praxis nicht möglich waren. Gegenwärtig noch, nachdem so viele Fortschritte in der Optik, in der Bearbeitung der Gläser gemacht worden sind, bei allen Hülfsmitteln, welche der Calcul dem Physiker liefert, gehört der Achromatismus doch noch sowohl für die Theorie als auch für die Praxis zu den delicatesten und schwierigsten Aufgaben. Hier können wir natürlich nur die Principien entwickeln, auf welchen die Construction achromatischer Prismen und Linsen beruht.

Wenn man zwei Prismen *A* und *B* so zusammenstellt, daß die brechenden Kanten nach entgegengesetzten Seiten gerichtet sind, so wird das eine die Wirkungen des anderen mehr oder weniger vollständig aufheben. Die durch *A* hervorgebrachte Farbenzerstreuung wird offenbar durch das Prisma *B* aufgehoben werden, wenn unter sonst gleichen Umständen ein jedes der beiden Prismen für sich allein ein eben so großes Spectrum giebt als das andere, denn in diesem Falle ist die Wirkung des Prismas *B*, in Beziehung auf die Farbenzerstreuung, der des Prismas *A* genau gleich und entgegengesetzt.

Fig. 306.



Wenn die Dispersion wirklich dem Brechungsvermögen proportional wäre, wie dies Newton meinte, so könnten zwei Pris-

men von verschiedenen Substanzen nur dann gleiche Spectra geben, wenn auch die durch das eine hervorgebrachte Ablenkung der des anderen gleich ist; wenn also zwei solcher Prismen in der Art, wie Fig. 306 zeigt, zusammengestellt sind, so würde durch dieses System freilich die Farbenzerstreuung, mit dieser aber auch zugleich die Ablenkung aufgehoben werden.

Nun aber haben spätere genaue Versuche gezeigt, daß Newton's Meinung in diesem Punkte irrig war; so ist z. B. die Dispersion im Flintglas bedeutend größer als beim Crownglas, während doch die mittleren Brechungsexponenten beider Glassorten nicht so sehr verschieden sind; bei gleicher Ablenkung ist das Spectrum eines Flintglasprismas ungefähr zweimal so groß als das eines Crownglasprismas.

Wenn der brechende Winkel der Prismen nicht gar zu groß ist, so kann man ohne merklichen Fehler annehmen, daß die Breite des Farbenbildes dem brechenden Winkel proportional sey; gesetzt nun, man habe ein Crownglasprisma von 25°, so kann man leicht den Winkel eines Flintglasprismas berechnen, welches dieselbe Farbenzerstreuung giebt. Da die totale Dispersion des Flintglases zweimal so groß ist als die des Crownglases, so muß der brechende Winkel des Flintglasprismas auch zweimal kleiner, also ungefähr 12½° seyn. Die Farbenzerstreuung eines Flintglasprismas von 12½° ist eben so groß wie die eines Crownglasprismas von 25°; zwei solcher Prismen also in der Weise combinirt, wie Fig. 306 andeutet, werden keine Farbenzerstreuung mehr hervorbringen.

Da aber die Brechungsexponenten der beiden Glassorten im Allgemeinen sehr nahe gleich sind, so werden sich die Ablenkungen der Prismen *A* und *B* nahe wie ihre brechenden Winkel verhalten, die Ablenkung, welche *A* hervorbringt, ist nahe zu dopelt so groß als die durch *B* hervorgebrachte, das Prisma *B* kann also auch die durch *A* hervorgebrachte Ablenkung nur ungefähr zur Hälfte aufheben, die Combination der Prismen *A* und *B* wird also noch eine Ablenkung, aber keine Farbenzerstreuung hervorbringen.

Eine jede einfache Linse, aus welchem Stoffe sie auch gebildet seyn mag, wird für jede andere Strahlenart auch einen anderen Brennpunkt haben, weil die Brechungsexponenten der verschiedenfarbigen Strahlen nicht gleich sind. Der Brennpunkt der rothen Strahlen liegt der Linse ferner als der Brennpunkt der violeten. Die Brennpunkte der rothen und violeten Strahlen fallen nicht bei allen Linsen gleichweit auseinander; es hängt dies nämlich einerseits von der Krümmung der Linsen, andererseits von dem Zerstreuungsvermögen der Substanz ab. Wenn die Krümmung der Linse von der Mitte bis zum Rande unbedeutend ist, so fallen auch die Brennpunkte für die verschiedenen Farben näher zusammen.

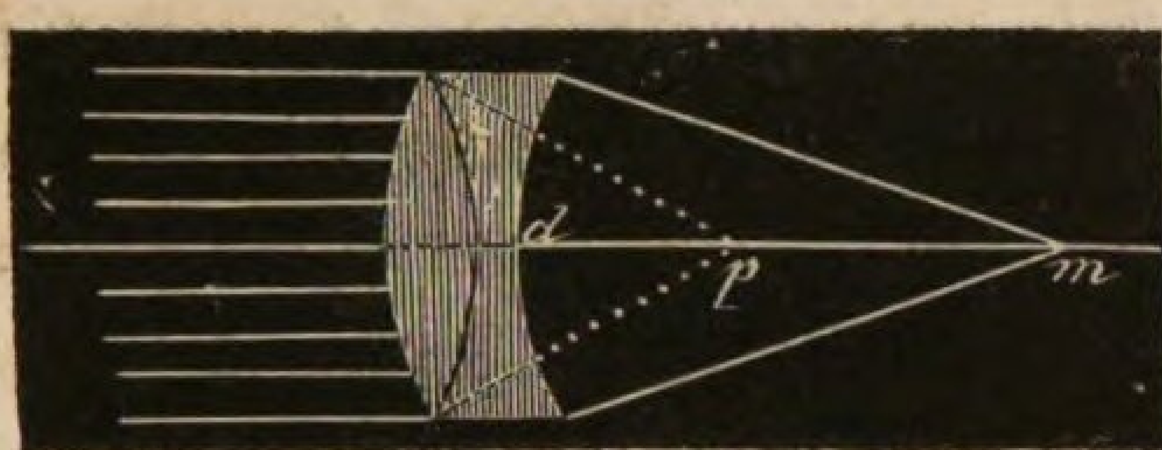
Der eben erwähnte Umstand hat zur Folge, daß die Bilder solcher Linsen mehr oder weniger unrein, daß sie bald mehr oder weniger mit farbigen Säumen eingefaßt erscheinen. Man kann sich davon leicht überzeugen, wenn man durch eine stark gewölbte Linse etwa die Lettern eines Buches betrachtet, oder

durch eine solche Linse das Bild entfernter Gegenstände auf einer matten Glastafel erzeugt; man wird Alles mit farbigen Rändern umgeben sehen. Weil nun aber dadurch die Schärfe der Bilder in Mikroskopen sowohl, als auch in Fernröhren sehr leidet, so war die Entdeckung der Construction achromatischer Linsen für die praktische Optik von der größten Wichtigkeit.

Der Achromatismus der Linsen beruht auf denselben Principien wie der Achromatismus der Prismen; achromatische Linsen sind aus einfachen Linsen verschiedener Glassorten zusammengesetzt. Gewöhnlich ist eine Crownglaslinse mit einer Flintglaslinse combinirt.

Die Wirkung der Linsen auf verschiedenfarbige Strahlen ist von der Art, daß eine Sammellinse die violeten Strahlen stärker convergiren, eine Hohllinse aber sie stärker divergiren macht als die rothen Strahlen; man begreift demnach wohl, wie eine Combination einer Hohllinse und einer Sammellinse, wie in Fig. 307, die Farbenzerstreuung ganz aufheben kann; wenn die beiden Linsen von verschiedenen Glassorten sind, so ist die Aufhebung der Farbenzerstreuung möglich, ohne daß deshalb auch die Brechung aufhört.

Fig. 307.



Wenn eine Sammellinse von Crownglas und eine Hohllinse von Flintglas gleich starke Farbenzerstreuung hervorbringen, so werden beide combinirt gar keine Farbenzerstreuung bewirken; da aber das Flintglas überhaupt stärker farbenzerstreuend wirkt, so wird eine Hohllinse von Flintglas, welche die Farbenzerstreuung einer Sammellinse von Crownglas aufhebt, doch nicht im Stande seyn, auch die durch die Sammellinse bewirkte Convergenz der Strahlen ganz aufzuheben, die beiden Linsen zusammen werden also noch wie eine Sammellinse wirken, während die Farbenzerstreuung aufgehoben ist; sie bilden also eine achromatische Linse.

Viertes Kapitel.

Vom Auge und den optischen Instrumenten.

Die Empfindung des Lichts und der Farbe rührt von einer Affection be- 128
sonderer Nerven her, deren feine Enden sich als eine Nervenhaut ausbreiten. Die Empfindung des Dunklen rührt von einer vollkommenen Ruhe dieser Nervenhaut her, jeder Reiz derselben bringt aber die Empfindung von Helligkeit, von Licht hervor; ganz vorzüglich wird dieser Reiz durch die Lichtstrahlen hervorgebracht, welche die Körper der Außenwelt durch das Auge auf die Nervenhaut,

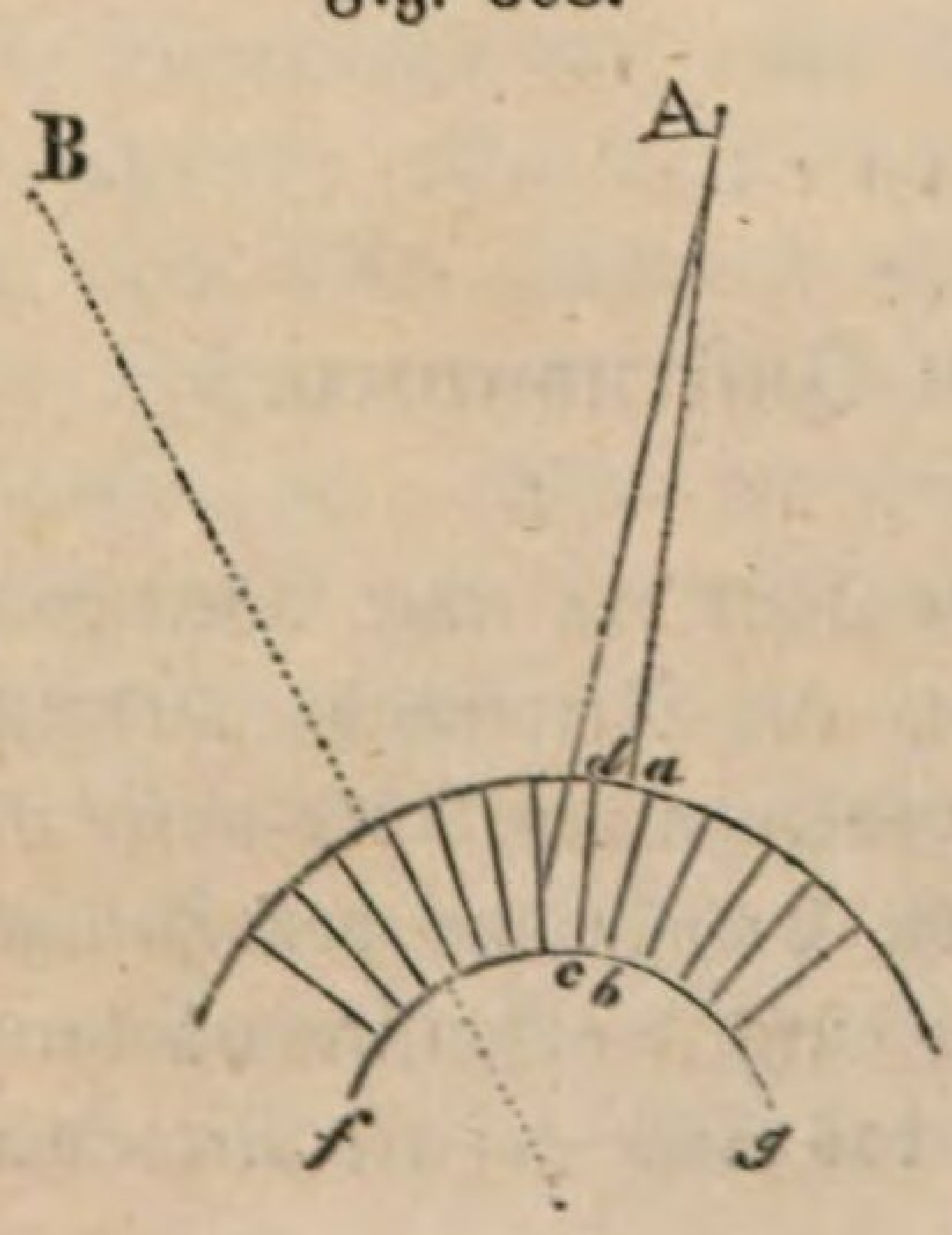
die **Netzhaut**, senden; doch ist auch die Empfindung von Licht und Farbe durch andere Ursachen ohne Mitwirkung der von außen kommenden Lichtstrahlen möglich, z. B. durch den Druck des Blutes (Flimmern vor den geschlossenen Augen). Ein äußerer Druck auf das geschlossene Auge, eine elektrische Entladung sind ebenfalls im Stande, Lichtempfindungen hervorzubringen.

Zum Unterscheiden äußerer Gegenstände durch das Gesicht reicht es nicht hin, daß die von einem Körper ausgehenden Lichtstrahlen auf die Nervenhaut fallen; es sind lichtsondernde Apparate nöthig, welche bewirken, daß die von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Strahlen nur eine bestimmte Stelle der Nervenhaut treffen, und daß von dieser Stelle die von anderen Punkten herkommenden Lichtstrahlen abgehalten werden; auf diese Weise sind die verschiedenen Stellen der Netzhaut verschieden afficirt, und dadurch wird eine Unterscheidung möglich. Wo solche lichtsondernde Apparate fehlen, wie dies bei vielen niederen Thierklassen der Fall ist, da kann kein eigentliches Sehen, sondern nur eine Unterscheidung von Licht und Dunkel, von Tag und Nacht stattfinden; doch sind selbst für eine solche Lichtempfindung noch besondere Nervenapparate nöthig.

Nicht bei allen Thierklassen, bei denen ein eigentliches Sehen stattfindet, sind die zur Isolirung der Lichteindrücke bestimmten Apparate auf dieselbe Weise eingerichtet; man unterscheidet zwei wesentlich verschiedene Arten von Augen, nämlich 1) die **musivisch zusammengesetzten** Augen der Insecten und Crustaceen und 2) die **mit Sammellinsen versehenen Augen** der Wirbelthiere.

129 **Zusammengesetzte Augen.** Erst durch die klassischen Untersuchungen **Müller's** ist das Wesen der **musivisch zusammengesetzten** Augen klar gemacht worden (Physiologie des Gesichtssinnes 1826 und Handbuch der Physiologie des Menschen 1837). Auf der convexen Nervenhaut steht eine ungeheure Menge durchsichtiger kleiner Kegel rechtwinklig auf, und nur diejenigen Strahlen können die Basis eines solchen Kegels auf der Nervenhaut erreichen, die in der Richtung der Axe dieses Kegels einfallen. Alles seitlich einfallende Licht wird absorbirt, weil die Seitenwände der Kegel mit einem dunkelfarbigen Pigmente bekleidet sind. In Fig. 308 sey *fcbg* ein Durchschnitt der convexen Nervenhaut mit den darauf sitzenden durchsichtigen Cylindern, so ist klar, daß die von dem leuchtenden Punkte *A* ausgehenden Strahlen nur in *cb*, der Basis des abgestumpften Kegels *abcd*, die Nervenhaut treffen können; schon die Basis der beiden neben *abcd* liegenden Kegel wird nicht mehr von den von *A* ausgehenden Strahlen getroffen; ein leuchtender Punkt *B* sendet seine Strahlen wieder an eine andere Stelle der Netzhaut u. s. w. Auf die Ba-

Fig. 308.



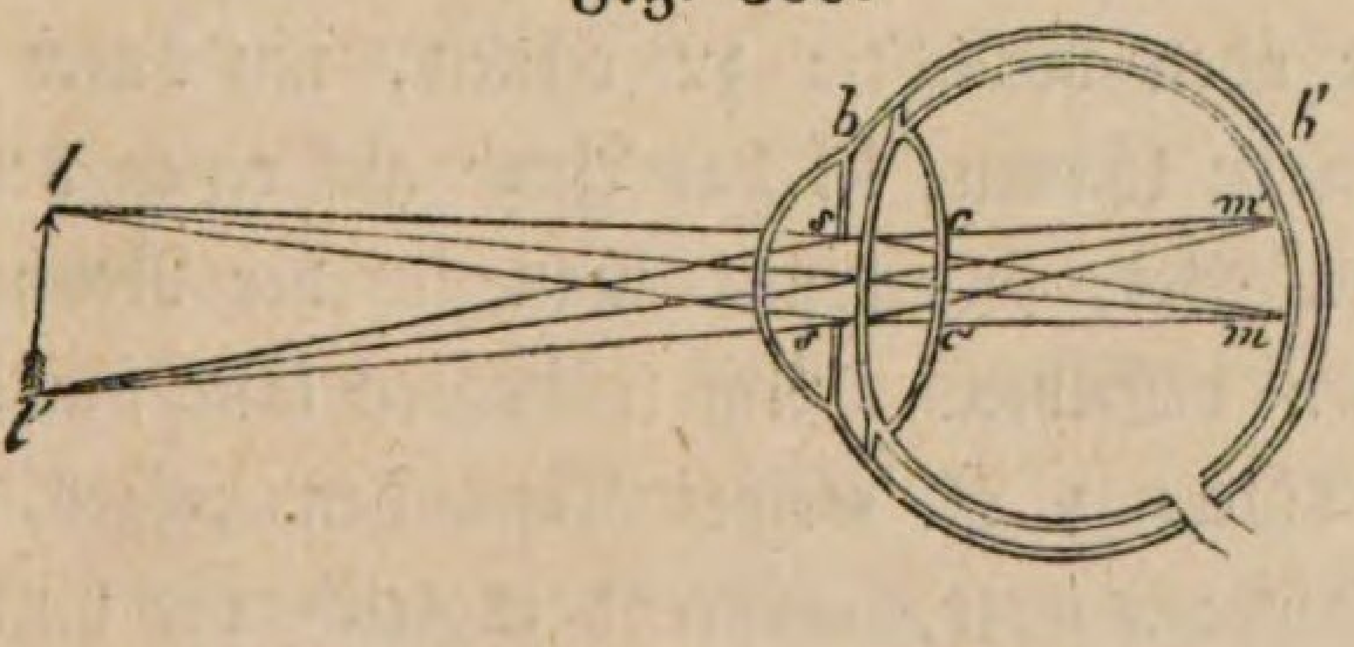
sis eines solchen durchsichtigen Kegels wird natürlich alles Licht wirken, welches von Punkten herkommt, die in der Verlängerung des Kegels liegen, und die Lichteindrücke von allen Punkten, welche Licht auf die Basis desselben Kegels senden, werden sich auch vermischen, und somit sieht man leicht ein, daß die Deutlichkeit des Bildes auf der Nervenhaut um so größer seyn wird, je größer die Anzahl der Kegel ist. Sehr treffend charakterisirt Müller das Sehen solcher Augen, indem er sagt: »Die Darstellung des Bildes in mehreren tausenden gesonderten Punkten, wovon jeder Punkt einem Feldchen der Außenwelt entspricht, gleicht einer Mosaik, und man kann sich aus einer kunstreichen Mosaik die beste Vorstellung von dem Bilde machen, welches die Geschöpfe, die eines solchen Organs theilhaftig sind, von der Außenwelt erhalten werden.«

Die Größe des Sehfeldes solcher Augen hängt natürlich von dem Winkel, den die Axen der äußersten Kegel mit einander machen, also von der Wölbung der Augen ab. Die durchsichtige Haut, welche das ganze Auge nach außen hin bedeckt, die Hornhaut, ist gewöhnlich in Facetten abgetheilt, und jede einzelne Facette entspricht einem der eben besprochenen durchsichtigen Kegel. Die Zahl der Facetten eines solchen Auges ist in der Regel sehr groß; ein einziges Auge enthält oft 12 bis 20 Tausend solcher Facetten.

Nicht alle Insecten haben solche musivisch zusammengesetzte Augen, die Spinnen z. B. haben einfache linsenhaltige Augen, welche ganz so gebaut sind wie die Augen der Wirbelthiere; ja es giebt viele Insecten, welche außer den musivisch zusammengesetzten auch noch einfache linsenhaltige Augen haben, doch läßt der Bau derselben, so wie auch ihre Stellung vermuthen, daß sie nur zum Sehen der allernächsten Gegenstände bestimmt sind.

Einfache Augen mit Sammellinsen. Auf der Netzhaut der mit 130
Collectivlinsen versehenen Augen entsteht das Bild ganz auf dieselbe Weise, wie die Sammelbilder der gewöhnlichen Linsen; die von einem Punkte des Gegenstandes ausgehenden Strahlen, welche die Vorderfläche des Auges treffen, werden nämlich durch die durchsichtigen Medien des Auges nach einem Punkte der Netzhaut hin gebrochen. Fig. 309 soll den Durchschnitt eines menschlichen Auges darstellen. Der ganze Augapfel ist von einer festen harten Haut umgeben, welche nur auf der Vorderseite durchsichtig ist; dieser durchsichtige Theil wird die Hornhaut (cornea), der weiße undurchsichtige Theil die harte Haut (tunica sclerotica)

Fig. 309.



genannt; die durchsichtige Hornhaut ist stärker gewölbt als der übrige Theil des Augapfels. Hinter der Hornhaut liegt die farbige Regenbogenheit (iris), welche eben ist und die Wölbung der durchsichtigen Hornhaut gleichsam von dem übrigen Theile des Auges abschneidet. In der Mitte der Regenbogenhaut bei *ss'* befindet sich eine kreisförmige Oeffnung, welche von vorn gesehen voll-

kommen schwarz (das Schwarze im Auge) erscheint; diese Oeffnung führt den Namen der **Pupille**. Hinter der Iris und der Pupille befindet sich die Krystalllinse *cc'*; sie befindet sich in einer durchsichtigen Kapsel, durch welche sie auch an der äußeren Wand, Hülle des Auges, befestigt ist. Zwischen der Linse und der Hornhaut befindet sich eine klare etwas salzige Flüssigkeit, die **wässrige Feuchtigkeit** (humor aqueus), der ganze Raum hinter der Linse ist dagegen mit einer durchsichtigen gallertartigen Substanz, der **Glasfeuchtigkeit** (humor vitreus), angefüllt. Die Krystalllinse selbst ist vorn flacher als hinten.

Ueber die Sclerotica ist im Inneren des Auges die **Aderhaut** (tunica choroidea) ausgebreitet, und über dieser endlich liegt die **Netzhaut** (retina), welche nur eine Ausbreitung des Sehnerven ist. Die Aderhaut, welche die ganze innere Höhlung des Auges bekleidet, ist mit einem schwarzen Pigment überzogen: diese Schwärzung ist nöthig, damit nicht durch Reflexionen im Inneren des Auges die Reinheit der Bilder gestört wird. Aus demselben Grunde werden ja auch die Fernröhre innen geschwärzt.

Die Lichtstrahlen, welche auf das Auge fallen, treffen entweder auf den vorderen Theil der Sclerotica, das **Weiße** im Auge, und werden unregelmäßig nach allen Seiten zerstreut, oder sie dringen durch die Hornhaut in das Auge ein; die äußeren der durch die Hornhaut eingedrungenen Strahlen fallen auf die Iris und werden nach allen Seiten hin unregelmäßig zerstreut, wodurch die Farbe der Regenbogenhaut sichtbar wird. Die centralen Strahlen endlich fallen durch die Pupille auf die Linse und werden durch dieselbe nach der Retina hin gebrochen, und zwar so, daß die von einem Punkte eines äußeren Gegenstandes ausgehenden Strahlen, welche durch die Pupille gehen, in einem Punkte auf der Netzhaut wieder vereinigt werden. So entsteht denn auf der Netzhaut ein Bild der vor dem Auge befindlichen Gegenstände. In Fig. 309 ist z. B. *m* das Bild des Punktes *l*, *m'* das Bild von *l'*.

Man kann sich leicht durch den Versuch an einem etwas großen Thierauge, etwa an einem Ochsen- oder Pferdeauge, davon überzeugen, daß auf der Netzhaut wirklich ein kleines verkehrtes Bild der vor dem Auge befindlichen Gegenstände entsteht; man braucht es nur oben vorsichtig zu öffnen, um durch die Glasfeuchtigkeit auf die Netzhaut sehen zu können; ist das Auge auf einen hellen Gegenstand, etwa auf ein Fenster gerichtet, so erkennt man auf der Netzhaut deutlich ein kleines verkehrtes Bildchen desselben. Am leichtesten läßt sich das Bild auf der Netzhaut weißsüchtiger Thiere, z. B. weißer Kaninchen, zeigen, bei welchen der schwarze Ueberzug der Aderhaut fehlt, während zugleich der hintere Theil der Sclerotica durchsichtig ist. An solchen Augen lassen sich die Netzhautbilder ohne weitere Präparation zeigen.

131 **Deutliches Sehen in verschiedenen Entfernungen.** Wir haben oben schon gesehen, daß das Bild einer Linse seine Lage ändert, wenn der Gegenstand genähert oder entfernt wird; das Bild entfernt sich nämlich um so mehr vom Glase, je näher der Gegenstand heranrückt. Da nun das Auge ganz

so wirkt wie eine Linse, da wir die Gegenstände nur dann scharf sehen können, wenn die Vereinigungspunkte der gebrochenen Strahlen genau auf die Netzhaut fallen, wenn also auf der Netzhaut ein scharfes Bild entsteht, so sollte man meinen, daß wir nur in einer bestimmten Entfernung die Gegenstände deutlich sehen könnten; doch zeigt die Erfahrung das Gegentheil, ein gesundes Auge kann alle Gegenstände deutlich sehen, die mehr als 8 Zoll weit entfernt sind, das Auge muß also offenbar die Fähigkeit haben, sich den verschiedenen Entfernungen zu accommodiren.

Man kann dies auch durch einen ganz einfachen Versuch darthun: man mache auf eine durchsichtige Glastafel einen kleinen schwarzen Fleck und halte die Tafel 10 bis 12 Zoll weit vom Auge, so kann man willkürlich den Fleck, oder durch die Glastafel hindurch die entfernteren Gegenstände deutlich sehen. Sieht man die entfernten Gegenstände deutlich, so erscheint der Fleck neblig und unbestimmt, umgekehrt aber erscheinen die fernen Gegenstände verwaschen, wenn man den Fleck deutlich sieht; wenn also die fernen Gegenstände deutlich erscheinen, so werden die vom dunklen Flecke ausgehenden Strahlen nicht auf der Netzhaut vereinigt, und umgekehrt; das Auge hat also die Fähigkeit, sich selbst für ein Sehen in die Nähe und in die Ferne einzurichten.

Wenn die von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Strahlen vor oder hinter der Netzhaut vereinigt werden, so wird auf der Netzhaut statt des hellen Punktes ein kleiner Zerstreuungskreis gebildet, und dies ist die Ursache, warum Gegenstände, die sich in einer Entfernung befinden, für welche das Auge nicht gerade accommodirt ist, undeutlich erscheinen. Das Accommodationsvermögen hat aber seine Gränzen, denn wenn die Gegenstände dem Auge gar zu nahe gebracht werden, so sind die inneren Veränderungen, deren das Auge fähig ist, nicht mehr hinreichend, um zu machen, daß das Bild auf die Netzhaut fällt; in diesem Falle liegen die Vereinigungspunkte hinter der Netzhaut, und auf der Netzhaut selbst bilden sich statt des scharfen Bildes Zerstreuungskreise der einzelnen leuchtenden Punkte, so daß keine scharfe Unterscheidung mehr möglich ist. Einen Stecknadelknopf z. B., den man nur 1 bis 2 Zoll weit vom Auge hält, kann man nicht deutlich sehen.

Da sich die Vereinigungsweite der Strahlen von der Linse entfernt, wenn die Gegenstände näher rücken, so ließe sich das deutliche Sehen in verschiedenen Entfernungen durch die Annahme erklären, daß man die Länge der Augenaxe willkürlich vergrößern und verkleinern könne; für nahe Gegenstände müßte dann die Augenaxe länger sein als für entfernte oder, mit anderen Worten, für nahe Gegenstände wäre die Netzhaut weiter von der Hornhaut entfernt.

Andere suchen die Accommodationsfähigkeit des Auges aus einer Veränderung der Krümmung der Hornhaut oder einer Verrückung der Linse zu erklären.

Weite des deutlichen Sehens, Kurzsichtigkeit und Fernsichtigkeit. 132 Es ist schon oben angeführt worden, daß man Gegenstände, die dem Auge gar zu nahe gebracht werden, nicht mehr deutlich sehen kann. Für ein jedes Auge giebt es eine bestimmte Entfernung, über welche hinaus man die

Gegenstände dem Auge nicht nähern darf, wenn man sie ohne Anstrengung noch deutlich sehen will; in diese Entfernung, welche die Weite des deutlichen Sehens oder auch nur die Sehweite genannt wird, hält man unwillkürlich beim Lesen ein Buch, welches mit Lettern von gewöhnlicher Größe gedruckt ist. Bringt man die Gegenstände näher, so kann man sie nur mit Anstrengung deutlich sehen, bei noch größerer Nähe endlich ist gar kein deutliches Sehen mehr möglich. Bei einem ganz gesunden Auge beträgt die Weite des deutlichen Sehens 8 bis 10 Zoll. Ein Auge, dessen Sehweite geringer ist, nennt man kurzsichtig, wenn sie aber größer ist, weitsichtig.

Die Undeutlichkeit des Sehens ganz naher Gegenstände rührt, wie schon erwähnt wurde, daher, daß die von einem Punkte des nahen Gegenstandes ausgehenden Strahlen so stark divergiren, daß die brechenden Medien des Auges nicht im Stande sind, sie so stark convergent zu machen, daß ihre Vereinigung auf der Netzhaut stattfände; da die Vereinigungsweite in diesem Falle hinter die Netzhaut fällt, so erscheinen sie mit einem Zerstreuungskreise. Wenn man nun die Bildung dieses Zerstreuungskreises zu verhindern im Stande ist, so kann man selbst ganz nahe vors Auge gebrachte Gegenstände noch deutlich sehen.

Man mache mit einer Stecknadel ein feines Loch in ein Kartenblatt und halte es dicht vor das Auge, so wird man durch dasselbe die Lettern eines ganz nahe gehaltenen Buches noch ganz deutlich, und zwar bedeutend vergrößert sehen, während man nach Entfernung des Kartenblattes durchaus keinen Buchstaben mehr zu erkennen im Stande ist. Der Grund liegt darin, daß von einem Punkte des ganz nahen Gegenstandes aus nur in einer einzigen Richtung durch die feine Oeffnung Strahlen ins Auge dringen können, und diese werden auch nur in einer einzigen Stelle die Netzhaut treffen, während, wenn das Kartenblatt die übrigen Strahlen nicht abhält, von einem Punkte des Gegenstandes aus ein ganzes Strahlenbündel durch die Pupille ins Auge gelangt, welches auf der Netzhaut einen Zerstreuungskreis bildet.

Durch eine feine Oeffnung in einem Kartenblatte, welche dicht vors Auge gehalten wird, sieht man begreiflicherweise nahe und ferne Gegenstände gleich scharf, ohne daß das Auge nöthig hätte, sich den Entfernungen zu accommodiren, da ja ohnehin die von einem Punkte des Gegenstandes ausgehenden Strahlen auch nur in einem Punkte die Netzhaut treffen; durch eine solche Oeffnung kann man deshalb auch zu gleicher Zeit nahe und ferne Gegenstände deutlich sehen. Es fragt sich nun, in welchem Accommodationszustande sich das Auge beim Sehen durch eine feine Oeffnung befindet? offenbar in dem normalen Zustande, zu dessen Erhaltung gar keine Thätigkeit erfordert wird, das Auge befindet sich in dem Zustande, wie es dem Sehen von Gegenständen, die sich in der Weite des deutlichen Sehens befinden, entspricht.

Hierher gehört auch der interessante und lehrreiche Scheiner'sche Versuch. Wenn man in ein Kartenblatt zwei feine Nadellöcher macht, deren Entfernung von einander kleiner seyn muß als der Durchmesser der Pupille,

und die Oeffnungen dicht vor das Auge hält, so sieht man einen kleinen Gegenstand, etwa einen Nadelknopf, den man innerhalb der Sehweite vor die Löcher hält, doppelt. Von dem kleinen Gegenstande gelangen nämlich nur zwei ganz feine Strahlenbündel durch die beiden Löcher ins Auge; diese beiden Strahlen convergiren aber nach einem Punkte, der hinter der Netzhaut liegt, sie treffen also die Netzhaut in zwei verschiedenen Punkten; es sind dies zwei isolirte Punkte des Zerstreuungskreises, welcher auf der Retina entstehen würde, wenn die übrigen Strahlen nicht durch das Kartenblatt aufgefangen würden.

Wenn man den kleinen Gegenstand mehr und mehr entfernt, so nähern sich die Bilder, weil die beiden durch die Löcher ins Auge fallenden Strahlen nun weniger divergiren und also auch nach einem Punkte hin gebrochen werden, welcher der Retina näher liegt. Hat man den Gegenstand bis auf die Weite des deutlichen Sehens vom Auge entfernt, so fallen die beiden Bilder vollkommen zusammen, weil ja alle Strahlen, die von einem Punkte ausgehen, der gerade um die Weite des deutlichen Sehens vom Auge entfernt ist, in einem Punkte der Netzhaut vereinigt werden.

Entfernt man den Gegenstand über die Weite des deutlichen Sehens hinaus, so sieht man ihn abermals doppelt. Durch die beiden kleinen Oeffnungen also sieht man einen feinen Gegenstand nur dann einfach, wenn er sich in der Weite des deutlichen Sehens befindet.

Auf den Scheiner'schen Versuch hat man Instrumente gegründet, welche zur Ermittelung der Sehweite dienen sollen und den Namen Optometer führen.

Die Kurzsichtigkeit (Myopie) und die Weitsichtigkeit (Presbyopie) sind Fehler, deren Grund wohl am richtigsten in einem mangelhaften Accommodationsvermögen zu suchen ist, was besonders daraus hervorgeht, daß die Gewöhnung einen großen Einfluß auf diese Fehler ausübt; Kurzsichtigkeit entsteht oft dadurch, daß das Sehen in der Ferne vernachlässigt wird, und Kinder, welche beim Lesen und Schreiben das Gesicht zu dicht auf das Papier halten, werden in Folge dessen kurzsichtig. Auch dadurch, daß man längere Zeit durch ein Mikroskop sieht, wird ein sonst gutes Auge vorübergehend kurzsichtig, ja dieser Zustand dauert oft mehrere Stunden lang.

Das einfachste Mittel, die Fernsichtigkeit und Kurzsichtigkeit zu verbessern, besteht, wie schon bemerkt wurde, darin, daß man eine feine, etwa in ein Kartenblatt gemachte Oeffnung dicht vor das Auge hält. Durch dieses Mittel, welches schon in dem bisher Gesagten seine Erklärung gefunden hat, wird die Schärfe des Bildes freilich auf Kosten der Helligkeit hergestellt.

Ein zweites Mittel sind die Brillengläser, und zwar wendet man bei kurzsichtigen Augen Hohlgläser, bei fernsichtigen Convergläser an. Bei einem kurzsichtigen Auge fallen die Bilder ferner Gegenstände vor die Netzhaut, und das Auge hat nicht das Vermögen, sich so zu accommodiren, daß sie auf die Netzhaut

selbst gebracht würden; man verändert deshalb das Refractionsvermögen des Auges durch vorgesetzte Hohlgläser in der Weise, daß die ins Auge gelangenden Strahlen weniger stark convergiren, und macht dadurch ihre Vereinigung auf der Netzhaut möglich.

Bei fernsichtigen Augen fällt das Bild naher Gegenstände hinter die Netzhaut, ohne daß das Auge im Stande ist, sich diesem Refractionsvermögen zu accommodiren; man wendet deshalb Convergläser an, um die Strahlen convergenter zu machen und dadurch ihren Vereinigungspunkt auf die Netzhaut zu bringen.

Je nachdem ein Auge mehr oder weniger kurzsichtig oder weitsichtig ist, muß man stärkere oder schwächere Gläser anwenden; man wählt die Gläser so, daß die Weite des deutlichen Sehens durch Mitwirkung der Gläser 8 bis 10 Zoll, also eben so groß ist, wie bei einem guten Auge.

Die Kurzsichtigkeit kommt am häufigsten im mittleren Lebensalter, die Fernsichtigkeit aber im höheren Alter vor.

133 **Beziehung zwischen den Empfindungen des Auges und der Außenwelt.** Der Act des Sehens beruht lediglich darauf, daß die Affectionen der Nervenhaut auf eine uns freilich unerklärliche Weise zum Bewußtseyn kommen. Eigentlich nehmen wir also nur einen bestimmten Zustand, eine gewisse Affection der Netzhaut wahr: daß wir aber diese Wahrnehmung nach außen verlegen, daß wir die Netzhautbilder gleichsam in Anschauungen der Außenwelt verwandeln, ist Sache eines unmittelbaren Urtheils; in diesem Urtheile haben wir durch fortwährende übereinstimmende Erfahrungen eine solche Sicherheit erlangt, daß wir die Netzhaut gar nicht als wahrnehmendes Organ empfinden, daß wir die unmittelbaren Empfindungen mit dem verwechseln, was nach unserem Urtheile die Ursache derselben ist. Die Substitution des Urtheils für die Empfindung geschieht ganz unwillkürlich, sie ist uns so zu sagen zur anderen Natur geworden.

Da wir überhaupt für die Empfindung auf der Netzhaut eine Vorstellung der Außenwelt setzen, so substituiren wir auch für jedes Netzhautbild einen Gegenstand außer uns. Daß wir den Gegenstand, welcher einem bestimmten Netzhautbildchen entspricht, nach einer bestimmten Richtung hin suchen, ist aber sicherlich ebenso das Resultat fortgesetzter consequenter Erfahrung, wie das nach außen Wirken des Gesichtssinnes überhaupt. Denken wir uns den Gegenstand und sein Netzhautbildchen durch eine gerade Linie verbunden, so ist dies die Richtung, nach welcher die Bilder nach außen hin projiciren.

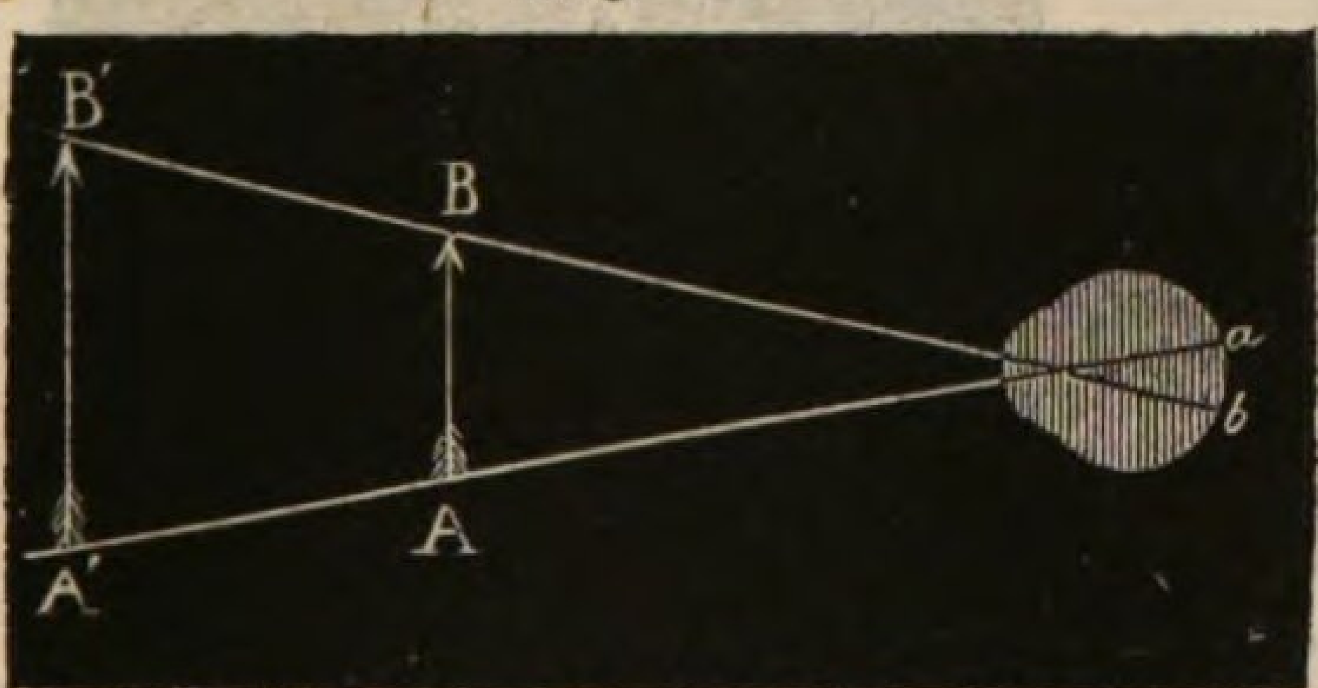
Es ist oben gezeigt worden, daß von den äußeren Gegenständen auf der Netzhaut verkleinerte und verkehrte Bilder entstehen, und es ist deshalb die Frage aufgeworfen worden, warum wir nicht alle Dinge verkehrt sehen? Diese Frage findet nun in den eben angestellten Betrachtungen ihre genügende Antwort; daß überhaupt ein Netzhautbild existirt, daß ein Bildchen auf dem oberen oder unteren Theile der Netzhaut liegt, daß es sich auf der rechten oder linken Seite derselben befindet, erfahren wir erst durch optische Untersuchungen;

die Empfindung der Nervenhaut kommt nicht als solche zum Bewußtseyn, sondern sie wird unwillkürlich nach einer bestimmten Richtung nach außen hin projicirt, und zwar in derjenigen Richtung, in welcher sich die Gegenstände befinden, welche die Netzhautbilder veranlassen. Nach dieser Richtung hin finden wir aber die Gegenstände auch durch andere sinnliche Wahrnehmungen, z. B. durch den Tastsinn; es besteht also zwischen den verschiedenen sinnlichen Wahrnehmungen in Beziehung auf die Ortsbestimmung die vollkommenste Harmonie; wir würden die Gegenstände verkehrt sehen, wenn diese Uebereinstimmung nicht stattfände.

Mit der durch das Gesichtsorgan vermittelten Vorstellung der außer uns befindlichen Dinge verbinden wir auch eine Vorstellung von ihrer Größe und Entfernung. Die Bildchen auf der Netzhaut liegen neben einander, und wenn wir die entsprechenden Gegenstände nicht als unmittelbar neben einander, sondern auch hinter einander befindlich erkennen, kurz wenn wir uns von der flächenhaften Wahrnehmung zu einer Vorstellung der Tiefe des Raumes erheben, so ist das nicht Sache der Empfindung, sondern des Verstandes. Das Kind hat noch keine Vorstellung von den Entfernungen, es greift nach dem Monde, wie es nach Dingen in seiner Umgebung greift. Die Vorstellung von der Tiefe des Sehraums erhalten wir erst dadurch, daß wir uns im Raume bewegen, daß sich die Bilder bei dieser Bewegung ändern, und daß wir durch unsere eigene Ortsveränderung einen Begriff von der Entfernung der Gegenstände bekommen.

Die scheinbare Größe der Gegenstände hängt von der Größe des Netzhautbildchens ab. Denken wir uns von den beiden Endpunkten eines Netzhautbildchens Linien nach den entsprechenden Endpunkten des Gegenstandes gezogen, so schneiden sich diese Linien unter einem Winkel, den man den **Sehwinkel** nennt; die Größe dieses Winkels ist aber der Größe des Netzhautbildes proportional, man kann deshalb auch sagen, daß die scheinbare Größe der Gegenstände von der Größe des Sehwinkels abhängt, unter welchem sie erscheinen. Zwei Gegenstände von verschiedener Größe, wie AB und $A'B'$, können gleiche scheinbare Größe haben, wenn ihre Größe ihrer Entfernung vom Auge proportional ist; verschiedene Gegenstände also, deren Größe sich verhält wie 1 : 2 : 3 u. s. w., werden in einfacher, doppelter, dreifacher Entfernung unter gleich großem Gesichtswinkel erscheinen.

Fig. 310.



Der Punkt im Auge, in welchem sich die Linien aA und bB schneiden, heißt der **Kreuzungspunkt**, er ist der Scheitelpunkt des Sehwinkels.

Unser Urtheil über die wahre Größe der Gegenstände und ihrer Entfernung wird erst durch fortgesetzte Erfahrung erlangt und kann durch Uebung einen bewundernswürdigen Grad von Sicherheit erreichen.

134 **Sehen mit zwei Augen.** Wenn wir beide Augen auf einen Gegenstand richten, so sehen wir ihn einfach, wenn das Auge für die Entfernung eingerichtet ist, in welcher er sich befindet; wir sehen ihn aber jederzeit doppelt, sobald sich die Augen einer größeren oder kleineren Entfernung accommodiren; wir sehen den Gegenstand scharf und deutlich, wenn wir ihn einfach sehen, undeutlich und verwaschen, sobald er doppelt erscheint.

Wir können ganz nach Willkür einen Gegenstand einfach oder doppelt sehen; man halte z. B. zwei Finger gerade hinter einander vor das Gesicht, und zwar so, daß der eine ungefähr 1 Fuß, der andere 2 Fuß weit entfernt ist, so sieht man den hintern doppelt, wenn man die Augenaxen auf den ersteren richtet; den vorderen aber, wenn man den hinteren fixirt.

In Fig. 311 seyen *L* und *R* die beiden Augen, *A* und *B* zwei in verschiedenen Entfernungen vor dem Auge befindliche Gegenstände. Wenn man den Gegenstand *A* fixirt, so sind die Axen beider Augen (die Augenaxe ist die gerade Linie, welche die Mitte der Netzhaut mit dem Mittelpunkte der Linse und der Pupille verbindet) nach *A* gerichtet, sie machen also einen ziemlich bedeutenden Winkel mit einander; das Bild von *A* erscheint aber in jedem Auge auf der Mitte der Netzhaut; fixirt man nun den entfernten Gegenstand *B*, wie dies in Fig 312 dargestellt ist, so wird der Winkel der Augenaxen kleiner, und nun erscheint das Bild von *B* in jedem Auge auf der Mitte der Netzhaut.

Wenn *A* fixirt ist, wie Fig. 311, so liegt das Bild von *B* im linken Auge rechts, im rechten aber links von der Mitte der Netzhaut; die Bilder *b* und *b'* liegen also in beiden Augen nicht auf entsprechenden Stellen der Netzhaut; und darin ist wohl auch der Grund zu suchen, warum der Gegenstand *B* hier doppelt

Fig. 311.

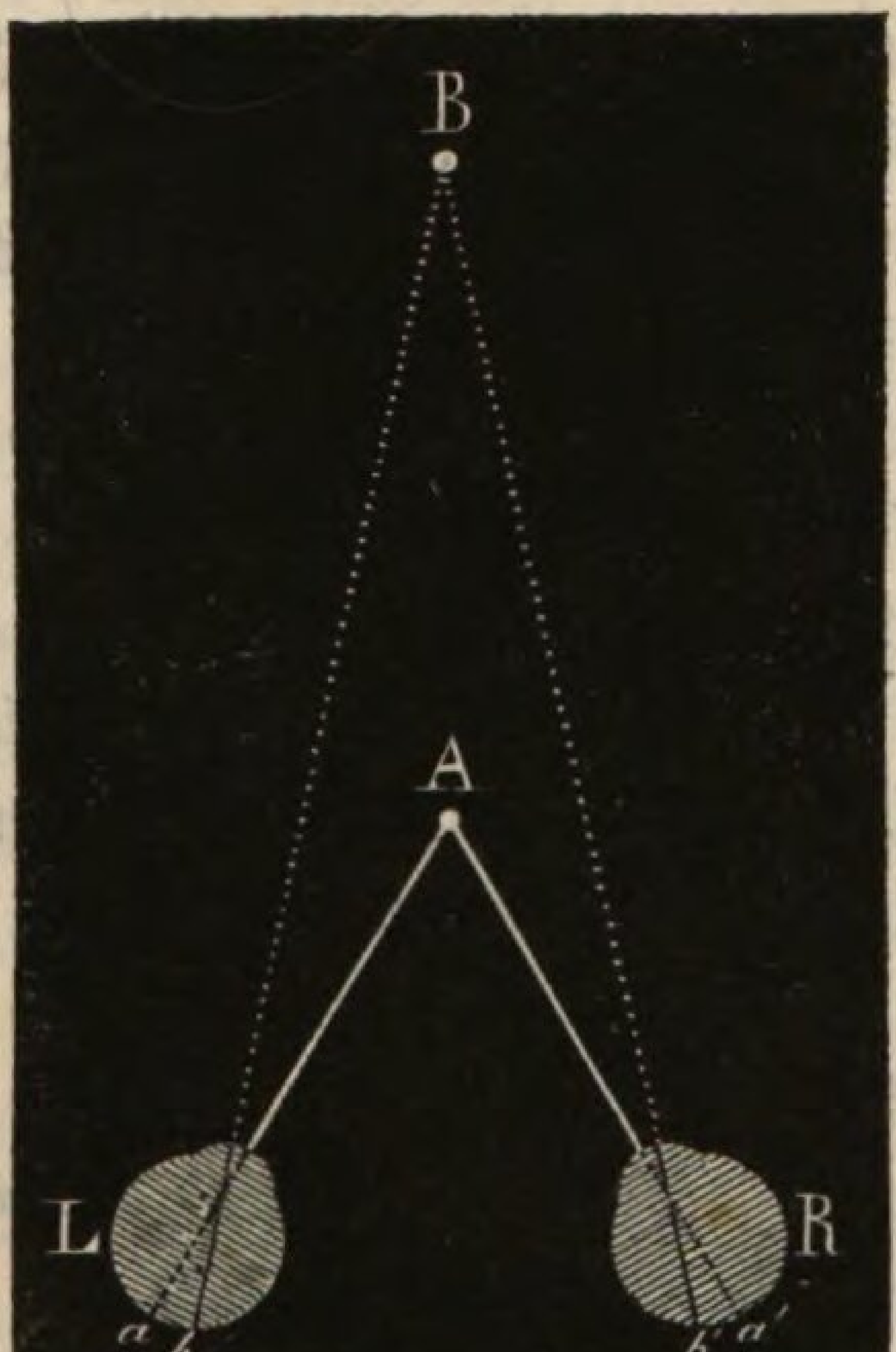
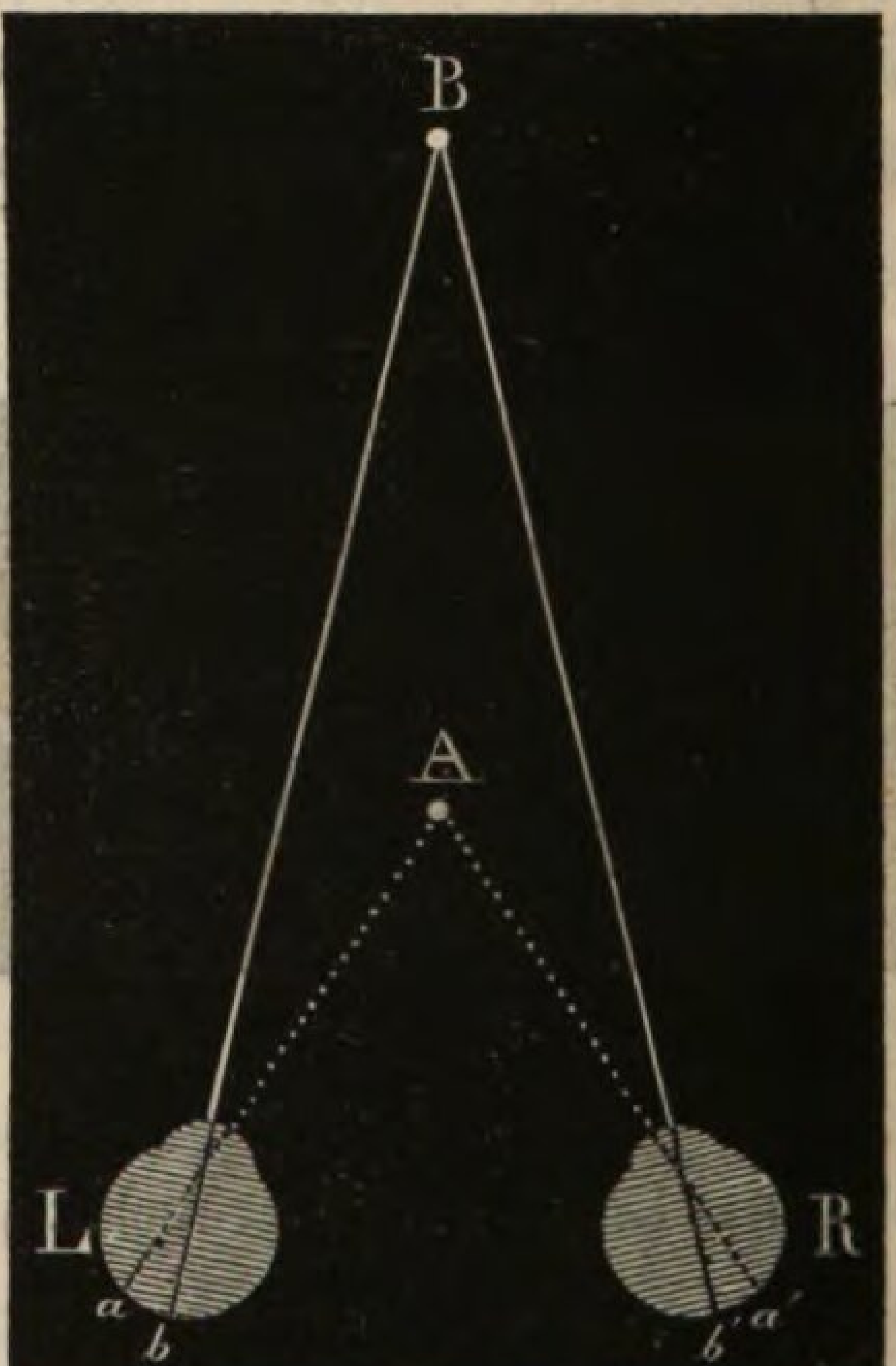


Fig. 312.



gesehen wird. Da das Bild *b* im linken Auge rechts von *a* liegt, so scheint uns *B* links von *A* zu liegen, während das rechte Auge den Gegenstand *B* rechts von *A* sieht, weil das Bild *b'* links von *a'* ist. Hat man den Gegenstand *A* mit beiden Augen so fixirt, daß man ihn nur einmal sieht, *B* aber doppelt erscheint, so kann man das linke oder rechte Bild von *B* verschwinden machen, je nachdem man die von *B* auf das linke oder rechte Auge fallenden Strahlen auffängt. Hat man hingegen den entfernten Gegenstand *B* fixirt, so daß *A* doppelt gesehen wird, wie in Fig. 312, so verschwindet das rechts erscheinende Bild von *A*, wenn man das linke Auge verdeckt.

Gränzen der Sichtbarkeit. Wenn ein Gegenstand noch gesehen wer- 135
den soll, so darf der Gesichtswinkel, unter welchem er erscheint, nicht unter einer gewissen Gränze liegen, die sehr von der Erleuchtung und der Farbe des Gegenstandes, der Natur des Hintergrundes und der Individualität der Augen abhängt. Für ein gewöhnliches Auge ist bei mäßiger Beleuchtung ein Gegenstand noch unter einem Sehwinkel von 30 Secunden sichtbar, ein sehr heller Gegenstand, wie ein glänzender Silberdraht, wird aber auf dunklem Grunde noch unter einem Gesichtswinkel von 2 Secunden gesehen. Auch dunkle Körper können auf weißem Grunde sehr deutlich gesehen werden, selbst wenn sie auch sehr fein sind; ein mittelmäßiges Auge kann ein Haupthaar vor dem mäßig hellen Himmel noch in einer Entfernung von 4 — 6 Fuß deutlich unterscheiden.

Dauer des Lichteindrucks. Wenn man mit einer glühenden Kohle 136
rasch einen Kreis beschreibt, so kann man die Kohle selbst nicht unterscheiden, sondern man sieht einen feurigen Kreis. Der Grund dieser Erscheinung liegt darin, daß eine durch einen Lichteindruck afficirte Stelle der Retina nicht augenblicklich wieder zur Ruhe kommt, wenn der Lichteindruck selbst aufgehört hat; aus demselben Grunde kann man auch die Speichen eines schnell laufenden Rades nicht unterscheiden, und die obere Fläche eines Kreisels, welcher mit abwechselnd weißen und schwarzen Sectoren bemalt ist, wie Fig. 313, erscheint bei rascher Rotation gleichförmig grau. Wenn aber der Kreisel, im Dunkeln rotirend, momentan erleuchtet wird, etwa durch einen Blitz oder einen elektrischen Funken, so kann man die einzelnen Sectoren deutlich unterscheiden.

Fig. 313.



Macht man in eine Pappscheibe von 2 — 3 Zoll Durchmesser diametral gegenüberstehend zwei Löcher, durch welche man Fäden zieht, wie Fig. 314 und 315 zeigen, so kann man mit Hülfe dieser Fäden die

Fig. 314.

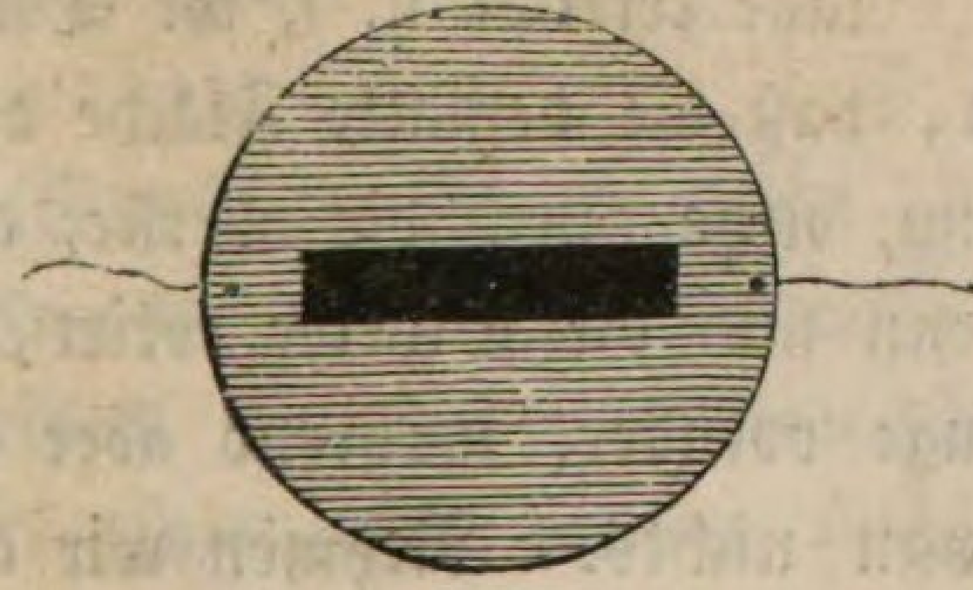
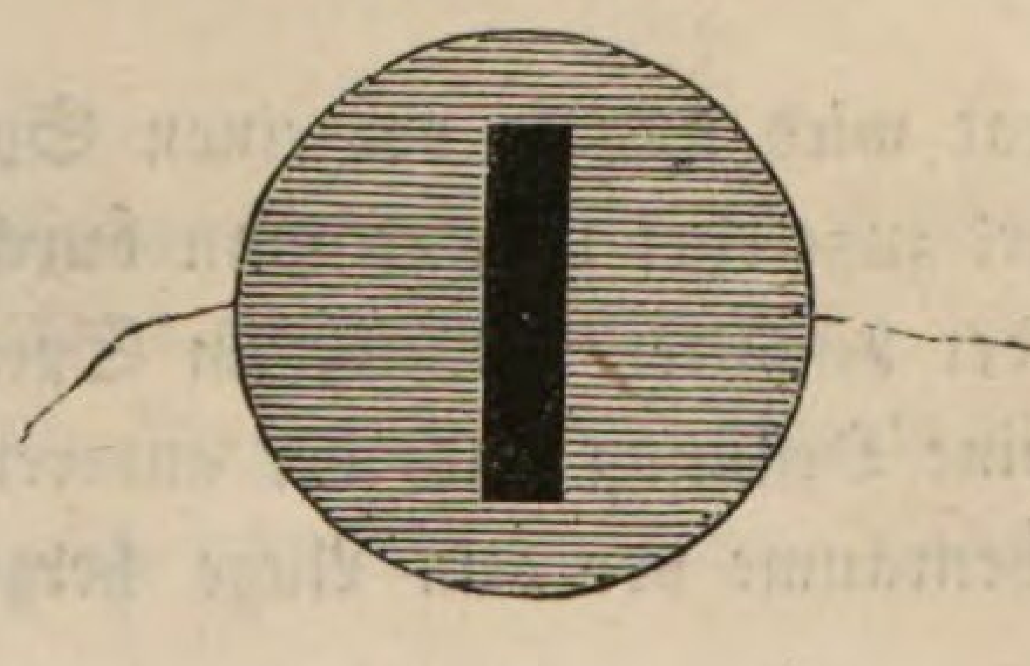


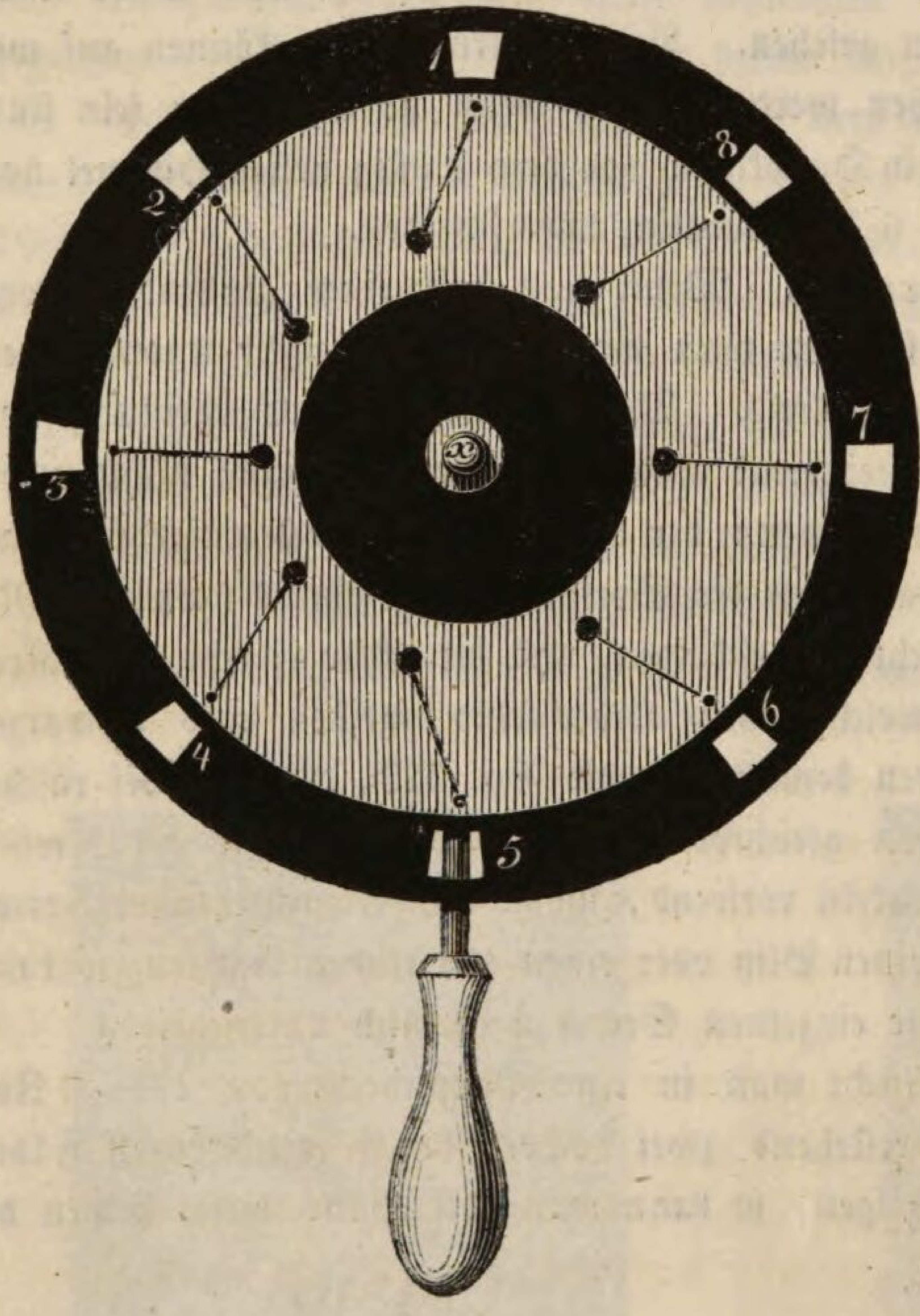
Fig. 315.



Scheibe rasch drehen, so daß man abwechselnd die eine und dann wieder die andere Seite sieht. Macht man nun auf die eine Seite einen schwarzen Streifen in der Richtung der beiden kleinen Löcher, auf die andere Seite einen Streifen, welcher auf dieser Richtung rechtwinklig steht, so sieht man bei rascher Umdrehung ein Kreuz, weil der Eindruck des horizontalen Streifens im Auge noch nicht erloschen ist, wenn der vertikale Streifen sichtbar wird. Ist auf die eine Seite ein Käfig, auf die andere ein Vogel gemalt, so erscheint bei rascher Drehung der Vogel im Käfig u. s. w.

Ein recht sinnreicher und artiger Apparat, welcher sich ebenfalls auf die Dauer des Lichteindrucks gründet, ist die sogenannte Wunderscheibe oder das Phenakistoskop. Eine Scheibe von 20 bis 25 Centimeter Durchmesser kann um eine horizontale Axe x in eine rasche Rotationsbewegung versetzt werden: am Rande dieser Scheibe befindet sich eine Reihe von Oeffnungen, welche in gleichen Abständen auf einander folgen; in der Fig. 316 dargestellten Wunderscheibe befinden sich 8 solcher Löcher. Innerhalb des durch die 8 Löcher gebildeten Ringes ist nun eine kleinere bemalte Scheibe befestigt, auf welcher ein und derselbe Gegenstand in 8 auf einander folgenden Stellungen abgebildet ist, so daß jedem Loche eine andere Stellung entspricht. In unserer Figur ist ein ganz einfacher Gegenstand gewählt, nämlich ein Pendel. Unter der mit 1 bezeichneten Oeffnung ist das Pendel dargestellt, wie es eben seine äußerste Stellung links erreicht hat; unter der Oeffnung 2 sehen wir das Pendel, wie es sich der Gleichgewichtslage schon wieder genähert hat, bei 3 hat es die Gleichgewichtslage erreicht u. s. w. Dieser Apparat wird nun so vor einen Spiegel gehalten, daß die bemalte Fläche dem Spiegel zugekehrt ist und man durch eine Oeffnung, etwa durch die oberste, das Bild der bemalten Scheibe im Spiegel sieht. Wenn nun die Scheibe rotirt, so geht eine Oeffnung nach der anderen vor dem Auge vorüber; während aber die Zwischenräume vor dem Auge hergehen, sieht man nichts. Nehmen wir an,

Fig. 316.



daß in einem bestimmten Momente die Oeffnung 1 vor dem Auge vorübergeht, so erblickt man unter derselben das Bild des Pendels in seiner größten Ausweichung; der in diesem Momente ins Auge gelangende Lichteindruck bleibt nun, bis die zweite Oeffnung vors Auge kommt, und nun erscheint das Pendel an derselben Stelle, an welcher man es eben erst in seiner größten Ausweichung gesehen hatte, der Gleichgewichtslage etwas genähert; das Bild dieser zweiten Lage bleibt im Auge, bis die dritte Oeffnung vor das Auge gelangt, und nun sieht man das Pendel in seiner Gleichgewichtslage u. s. w.; die auf diese Weise der Reihe nach dem Auge vorgeführten Stellungen des Pendels machen nun täuschend den Eindruck, als ob man ein Pendel wirklich oscilliren sähe. Statt des Pendels kann man auch andere Gegenstände wählen, die man der Reihe nach in eben so viel verschiedenen Stellungen dargestellt hat, als Löcher vorhanden sind, so daß jeder Oeffnung eine andere Stellung entspricht. Sehr täuschend lassen sich auf diese Weise Bewegungen von Menschen und Thiergestalten darstellen, die man in den verschiedenen auf einander folgenden Stellungen aufgezeichnet hat.

Ebenso wie die Gegenstände eine gewisse Größe haben müssen, um durch das Auge wahrnehmbar zu seyn, ebenso muß auch der Lichteindruck eine namhafte Zeit andauern, um eine Wirkung auf die Netzhaut hervorzubringen; aus diesem Grunde wird ein sehr schnell sich bewegender Körper, z. B. eine Kanonenkugel, nicht gesehen; das Bild der fliegenden Kugel bewegt sich auf der Netzhaut mit solcher Geschwindigkeit, daß es an keiner Stelle wahrgenommen werden kann.

Die Nachwirkungen auf der Netzhaut sind um so stärker und dauern um so länger fort, je intensiver und andauernder die primitive Einwirkung war. Die Nachbilder heller Gegenstände sind hell, die Nachbilder dunkler Gegenstände dunkel, wenn das Auge einer ferneren Lichteinwirkung entzogen wird. Sieht man z. B. längere Zeit unverwandt durch ein Fenster nach dem hellen Himmel, wendet man alsdann das Auge weg, indem man es zugleich schließt, so sieht man noch immer die hellen Zwischenräume begränzt durch die dunklen Fensterrahmen; wendet man dagegen das Auge auf eine weiße Wand, so erscheint im Nachbild hell, was im ursprünglichen dunkel war, und umgekehrt; man sieht z. B. die Fensterrahmen hell und die Zwischenräume dunkel. Diese Umkehrung ist leicht zu erklären: wird das geblendete Auge auf die weiße Wand gerichtet, so sind die vorher durch das helle Licht afficirten Stellen der Netzhaut weniger empfindlich gegen das weiße Licht der Wand, als diejenigen Stellen der Netzhaut, auf welche das Bild der dunklen Fensterrahmen gefallen war.

Farbige Nachbilder. Unser Gesichtsorgan empfindet oft Farbeneindrücke, die nicht unmittelbar durch äußere Objecte hervorgebracht sind, sondern in einem eigenthümlich gereizten Zustande der Netzhaut ihren Grund haben. Man nennt solche Farben subjective oder auch physiologische. Die far- 137

bigen Nachbilder sowohl als auch die Farben, welche durch Contraste hervorgebracht werden, gehören hierher.

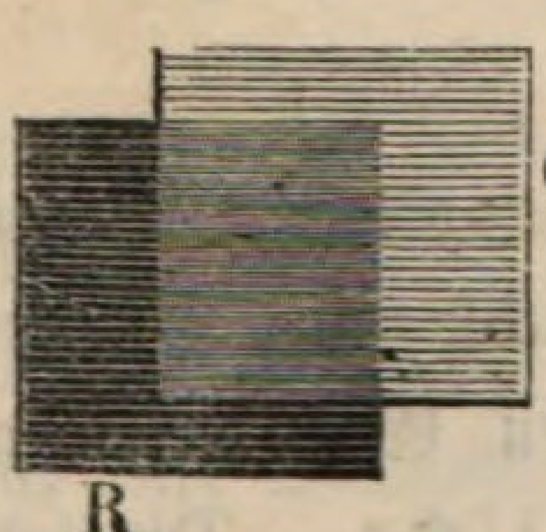
Die Nachbilder, von denen in voriger Nummer die Rede war, sind immer mehr oder weniger gefärbt, und zwar ist diese Färbung um so entschiedener, je intensiver der primitive Lichteindruck war, welcher die Nachbilder veranlaßte. Man fixire z. B. einige Zeit lang ein Kerzenlicht recht scharf, schließe dann die Augen und wende sie nach einer dunklen Stelle des Zimmers, so glaubt man noch immer, die Flamme vor den Augen zu haben, aber sie verändert nach und nach ihre Farbe; sie wird alsbald ganz gelb, geht dann durch Orange in Roth, von Roth durch Violet in grünliches Blau über, welches immer dunkler wird, bis das Nachbild endlich ganz verschwindet. Wendet man hingegen das durch das Kerzenlicht geblendete Auge auf eine weiße Wand, so folgen sich die Farben des Nachbildes in fast entgegengesetzter Ordnung, d. h. man sieht anfangs ein ganz dunkles Nachbild auf dem hellen Grunde, welches alsbald blau, grün, gelb wird, bis es endlich von dem weißen Grunde nicht mehr zu unterscheiden ist, wenn die Netzhaut sich ganz wieder erholt hat. Der Uebergang von einer Farbe zur anderen beginnt am Rande und verbreitet sich von da aus nach der Mitte. Dieselbe Reihe von Farbenerscheinungen beobachtet man an den Blendungsbildern weißer Papiere, die auf schwarzem Grunde liegend von der Sonne beschienen sind u. s. w.

Wenn man, während noch das farbige Nachbild im geschlossenen Auge ist, das Auge öffnet und auf eine weiße Wand richtet, so erblickt man ein Bild auf dieser Wand, welches demjenigen complementär ist, welches man zu derselben Zeit bei geschlossenem Auge wahrnimmt. Ist das Nachbild im geschlossenen Auge roth geworden, so erblickt man ein grünes Bild, wenn man das Auge öffnet und auf eine weiße Fläche richtet.

Wenn man längere Zeit einen farbigen Fleck auf weißem Grunde scharf fixirt und dann das Auge seitwärts auf die weiße Fläche richtet, so sieht man ein complementär gefärbtes Nachbild; war der Fleck blau, so ist das Nachbild gelb, war er roth, so ist es grün u. s. w. Diese Erscheinung erklärt sich dadurch, daß die Netzhaut für die Farbe des Objectes abgestumpft und also für diejenigen im weißen Lichte enthaltenen Farben empfindlicher wird, die nicht in der Nüance des Objectes enthalten sind, welches die Blendung veranlaßte.

Daß die Retina durch das längere Betrachten eines stark erleuchteten farbigen Gegenstandes allmälig gegen diese Farbe abgestumpft wird, geht auch daraus hervor, daß sie nach und nach immer matter und unscheinbarer wird. Man kann sich davon am leichtesten auf folgende Weise überzeugen. Man fixire längere Zeit ein farbiges, etwa ein rothes Quadrat, welches sich auf einem weißen Grunde befindet, und wende dann das Auge nur etwas seitwärts, so daß das complementäre Nachbild zum Theil noch auf das farbige Quadrat fällt, wie dies Fig. 317

Fig. 317.



angedeutet ist. Der freie Theil des Nachbildes erscheint jetzt grün, der frei gewordene Theil des ursprünglichen Bildes, d. h. derjenige Theil, welcher seine Strahlen jetzt auf Stellen der Netzhaut sendet, die vorher noch nicht von dem rothen Lichte getroffen waren, erscheint lebhaft roth; da aber, wo beide Quadrate über einander fallen, sieht man ein weit matteres Roth, denn die von diesem Theile des objectiven rothen Quadrates ausgehenden Strahlen treffen noch immer solche Stellen der Netzhaut, welche gegen den Eindruck des rothen Lichts schon mehr abgestumpft sind.

Contrastfarben. Ein grauer Fleck erscheint auf einer weißen Fläche 138
dunkler, auf einer schwarzen heller, als wenn die ganze Fläche mit demselben grauen Tone überzogen wäre. Ein Versuch, welcher dies recht deutlich zeigt, ist folgender: Man bringe einen schmalen undurchsichtigen Körper, etwa ein Bleistift, zwischen eine Kerzenflamme und eine weiße Fläche, so wird man einen dunklen Schatten auf hellem Grunde sehen; bringt man nun eine zweite Kerzenflamme neben die erstere, so sieht man zwei dunkle Schatten auf dem hellen Grunde; jeder dieser Schatten ist aber jetzt durch eine Kerze eben so stark erleuchtet, als vorher die ganze Fläche war, und doch hielt man vorher die Fläche für hell und jetzt den Schatten für dunkel; dieser Versuch beweist den bedeutenden Einfluß des Contrastes.

Noch auffallender sind die Contrasterscheinungen bei Betrachtungen farbiger Gegenstände, wobei man oft complementäre Farben sieht, welche objectiv gar nicht vorhanden sind.

Legt man einen schmalen grauen Papierschnitzel auf ein lichtgrünes Papier, so erscheint der Streifen röthlich; legt man ihn auf ein blaues Papier, so erscheint er gelb; kurz, er erscheint immer complementär zur Farbe des Grundes. Sehr deutlich nimmt man die Erscheinung wahr, wenn man einen ungefähr 1^{mm} breiten Streifen von weißem Papier auf eine Tafel von farbigem Glase klebt und dann durch dasselbe nach einer weißen Fläche, etwa nach einem Blatte weißen Papiers, sieht, oder auch, indem man die eine Seite des Glases ganz mit einem dünnen Papier bedeckt, auf die andere den schmalen Streifen befestigt und dann das Glas vor eine Kerzenflamme hält; der Streifen erscheint dann complementär zur Farbe des Glases, also roth auf einem grünen Glase, blau auf einem gelben u. s. w.

Hierher gehören auch die sogenannten farbigen Schatten, welche erscheinen, wenn in farbigem Lichte ein schmaler Körper einen Schatten wirft und dieser Schatten durch weißes Licht beleuchtet ist. Man erhält solche farbigen Schatten am leichtesten auf folgende Weise: Man läßt Lichtstrahlen durch ein farbiges Glas auf eine weiße Fläche, etwa auf weißes Papier, fallen, so daß sie nun farbig erscheint; fängt man nun an irgend einer Stelle die das Papier beleuchtenden farbigen Strahlen durch einen schmalen Körper auf, so erhält man einen schmalen Schatten, welcher nur durch das ringsum verbreitete weiße Tageslicht erhellt ist; dieser Schatten erscheint nun complementär zum Grunde; wendet man ein rothes Glas an, so erscheint der Schatten grün; er erscheint

blau, wenn man ein gelbes Glas anwendet u. s. w. Die Farben dieser Schatten sind rein subjectiv.

Manchmal beobachtet man auch farbige Schatten, welche wirklich objectiv verschiedenfarbig sind; sie entstehen, wenn ein Körper bei doppelter Beleuchtung zwei Schatten wirft und die beiden Lichtquellen verschiedene Farben haben; denn nun ist der eine Schatten nur durch Licht von der einen, der andere Schatten nur durch Licht von der anderen Farbe beleuchtet. Solche farbigen Schatten entstehen, wenn in der Dämmerung das bläuliche Himmelslicht in ein Zimmer fällt, in welchem sich eine brennende Kerze befindet; hält man ein Stäbchen so, daß es einen Schatten im Kerzenlichte, einen zweiten im Tageslichte auf eine weiße Fläche wirft, so erscheint der eine Schatten blau, der andere gelb, weil der eine nur durch das bläuliche Tageslicht, der andere nur durch das gelbliche Kerzenlicht beleuchtet ist; doch möchte auch bei diesem Falle der Contrast einen großen Einfluß auf die Intensität der Farbenerscheinung, und somit die Erscheinung einen theils objectiven, theils subjectiven Grund haben.

Was die Erklärung der farbigen Nebelbilder betrifft, so ist sie wohl darin zu suchen, daß, wenn irgend ein Theil der Netzhaut durch farbiges Licht afficirt wird, diese directe Wirkung auch auf die benachbarten Stellen der Netzhaut in der Weise reagirt, daß sie in einen dem primitiven Eindrucke complementären Zustand versetzt werden.

Jede Zusammenstellung von Farben, welche complementär zu einander sind, macht einen angenehmen Eindruck auf das Auge, was leicht begreiflich ist, wenn man bedenkt, daß, wenn irgend ein Theil der Netzhaut direct durch irgend eine Farbe afficirt wird, sie ja selbst ein Bestreben zeigt, auf den benachbarten Stellen diesen Gegensatz hervorzurufen. Jede Zusammenstellung nicht complementärer Farben ist dagegen unharmonisch und macht einen um so unangenehmeren Eindruck, je intensiver die Farben sind; man nennt solche Zusammenstellungen grell oder schreiend. So wir z. B. eine grüne Uniform mit carmoisinrothen Aufschlägen einen angenehmen Eindruck machen, eine rothe Uniform mit gelben Aufschlägen würde dagegen Jedermann für geschmacklos erklären.

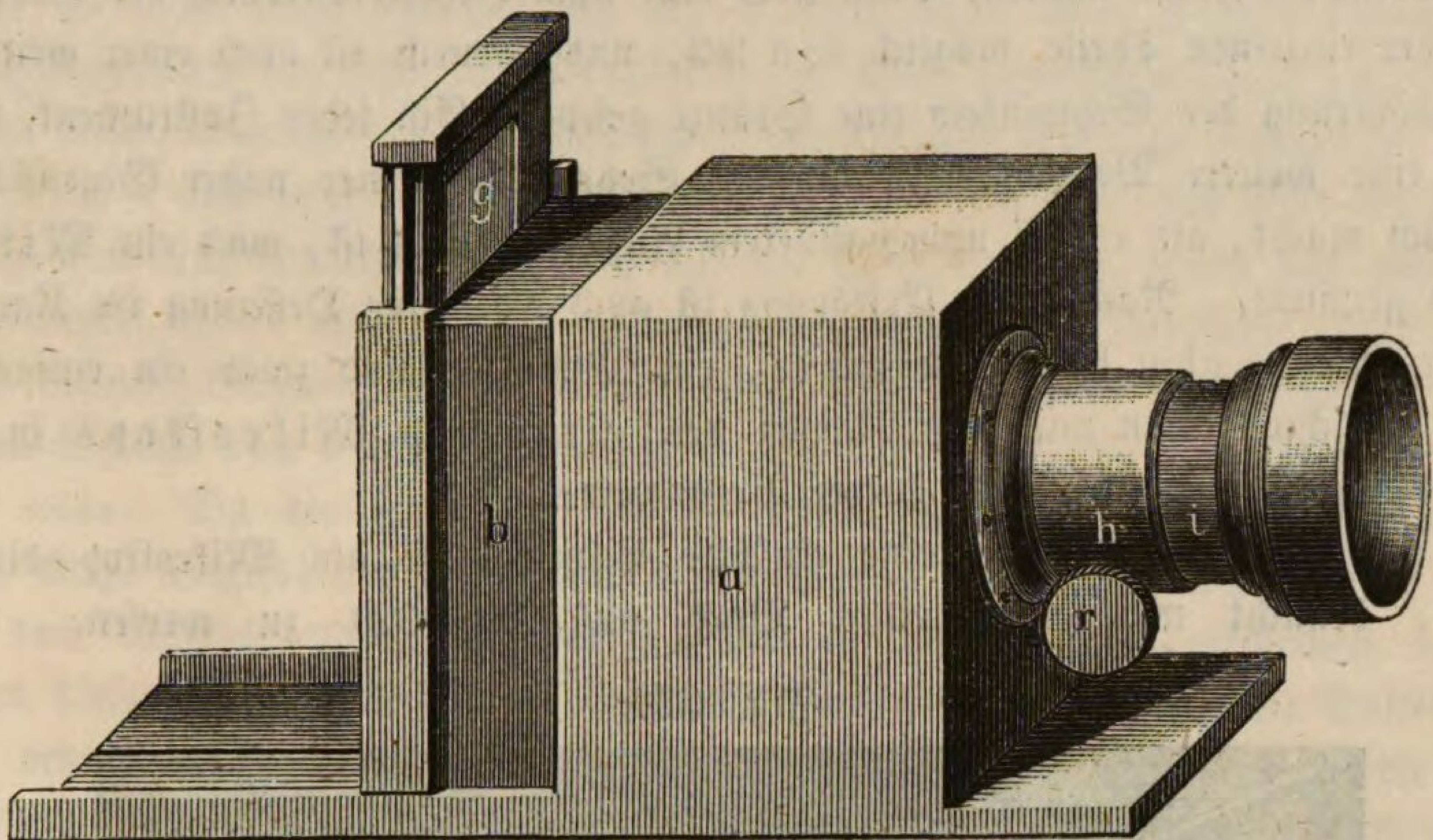
139 **Die camera obscura.** Die von dem Neapolitaner P o r t a um die Mitte des 17ten Jahrhunderts erfundene camera obscura besteht im Wesentlichen aus einer Sammellinse von etwas großer Brennweite, durch welche ein Bild entfernter Gegenstände, etwa einer Landschaft, entworfen wird; um den Effect dieses Bildes möglichst zu heben, muß von der Fläche, auf welcher es aufgefangen wird, alles seitliche, nicht hierher gehörige Licht sorgfältig ausgeschlossen werden, d. h. es muß in einer d u n k l e n K a m m e r aufgefangen werden.

Setzt man die Linse in den Laden eines dunklen Zimmers, so wird man auf einem in gehöriger Entfernung der Linse gegenüberstehenden Schirme das Bild der außerhalb befindlichen Gegenstände erhalten. Dies ist die ursprüngliche Form der camera obscura.

Später wurde das Zimmer durch einen transportablen innen geschwärzten

Kasten ersetzt. Fig. 318 zeigt den Apparat in der Form, wie er zum Daguerreotypiren angewendet wird. Auf der Vorderseite des Kastens *a* ist eine messingene Hülse *h* befestigt, in welcher sich eine zweite *i* mittelst eines Triebes, der durch den Kopf *r* bewegt wird, aus- und einschieben läßt. Diese Hülse *i*

Fig. 318.



enthält die achromatische Linse, welche ihre Bilder auf einer ihr gegenüberstehenden mattgeschliffenen Glastafel entwirft. Diese Glastafel *g* ist in einem Schieber befestigt, welcher die Rückwand des in den Kasten *a* hineinpassenden nach vorn hin offenen Kastens *b* bildet. Unsere Figur zeigt den Schieber mit der Glastafel etwas in die Höhe gezogen. Je näher der Gegenstand rückt, dessen Bild man erhalten will, desto weiter muß man den Kasten *b* aus *a* herausziehen. Die feinere Einstellung geschieht durch Verschiebung der Linse mittelst des schon erwähnten Triebes *r*.

Fig. 319.

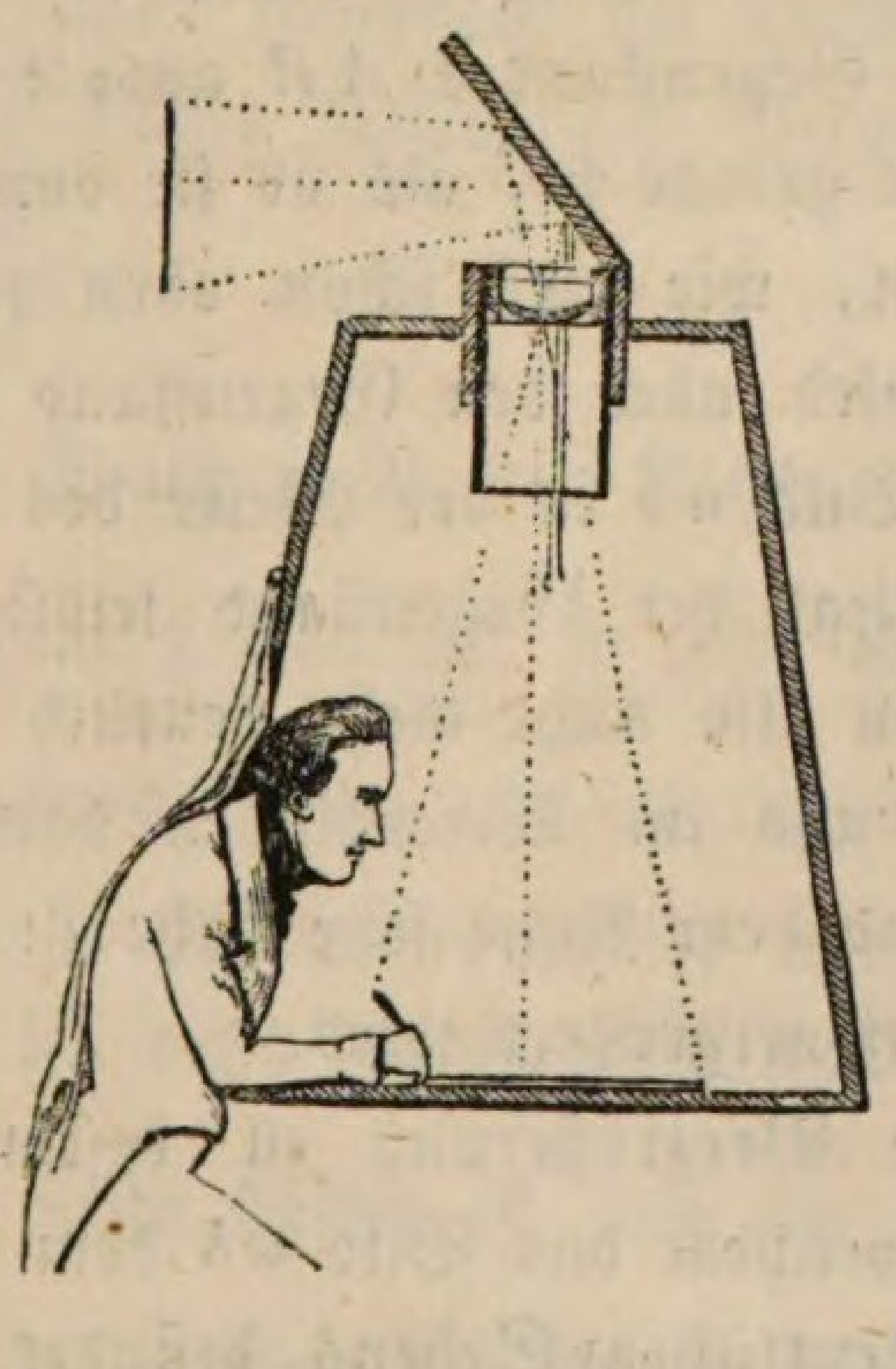
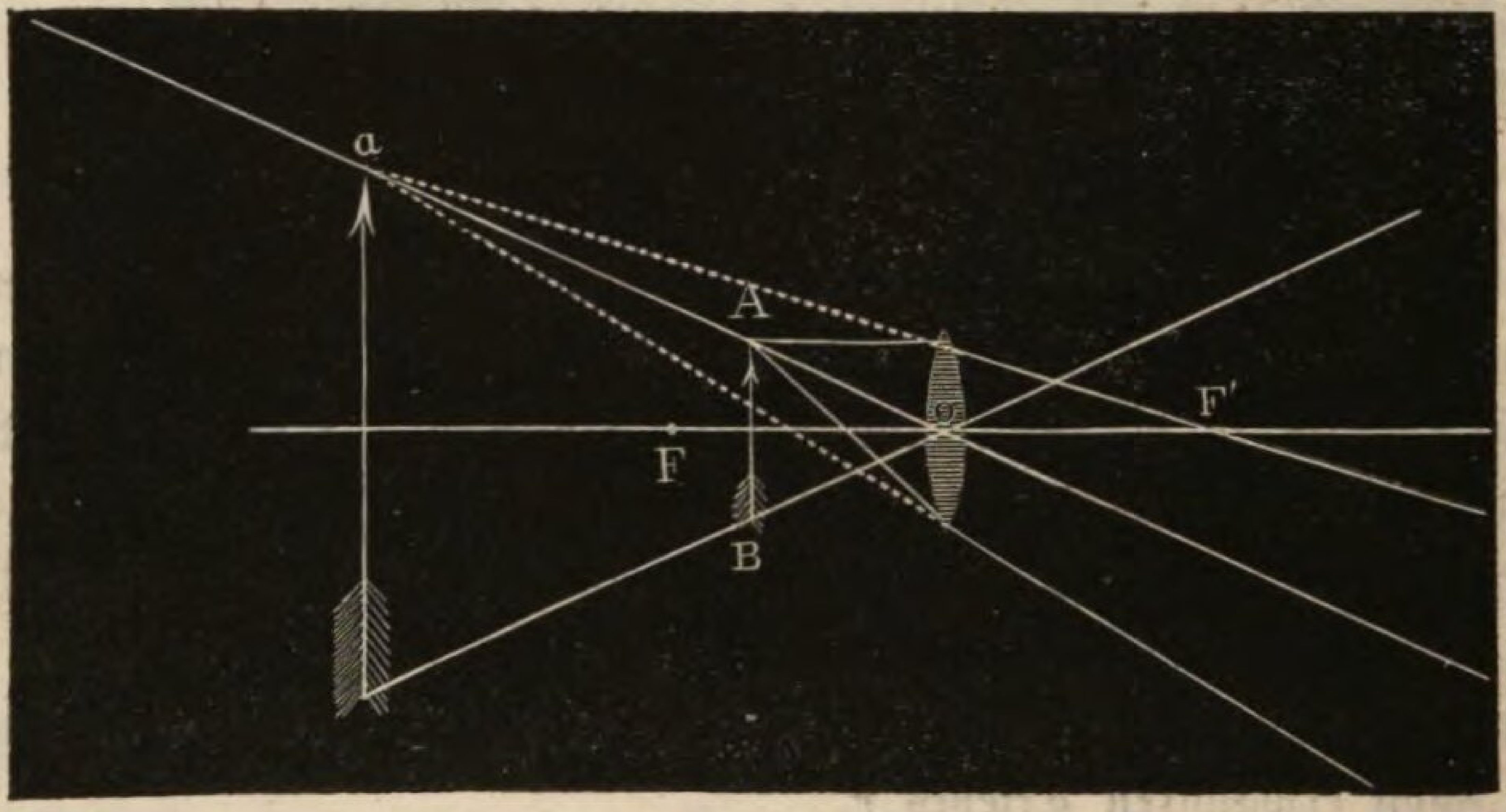


Fig. 319 stellt eine ältere Form der camera obscura dar; sie besteht aus einem ziemlich hohen Kasten, auf dessen Boden ein Blatt weißes Papier gelegt wird; durch die obere Fläche des Kastens geht eine Röhre, welche die Sammellinse enthält, über welcher sich dann ein in einem Winkel von 45° gegen die Vertikale geneigter ebener Spiegel befindet. Die von dem Gegenstande kommenden Strahlen werden durch den Spiegel nach unten reflectirt, so daß das Bild auf der Fläche des Papiers entsteht; man kann also die Contouren dieses Bildes leicht mit Bleistift nachfahren.

140 **Die Luppe oder das einfache Mikroskop.** Wir haben oben gesehen, daß die scheinbare Größe eines Gegenstandes von der Größe des Sehwinkels abhängt, unter welchem er erscheint; der Sehwinkel wird aber um so größer, je mehr der Gegenstand dem Auge genähert wird; nun aber können wir ihn nur bis zu einer gewissen Gränze, der Weite des deutlichen Sehens, dem unbewaffneten Auge nähern, wenn noch eine scharfe Unterscheidung der Gränzen und der einzelnen Theile möglich seyn soll, und dadurch ist auch einer weiteren Vergrößerung des Sehwinkels eine Gränze gesetzt. Ein jedes Instrument, welches eine weitere Vergrößerung für den Sehwinkel kleiner naher Gegenstände möglich macht, als es bei unbewaffnetem Auge der Fall ist, wird ein Mikroskop genannt. Nach dieser Erklärung ist auch die kleine Oeffnung im Kartenblatte, welche oben besprochen wurde, ein Mikroskop und zwar ein einfaches, doch bezeichnet man mit dem Namen des einfachen Mikroskops in der Regel nur Collectivlinsen von kurzer Brennweite.

Um zu begreifen, wie eine einfache Sammellinse als Mikroskop dienen kann, braucht man nur einen Blick auf Fig. 320 zu werfen. Es

Fig. 320.



sey *AB* ein Gegenstand, der sich innerhalb der Brennweite der Linse befindet, so divergiren alle von einem Punkte des Gegenstandes *AB* ausgehenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch die Linse gerade so, als ob sie von dem entsprechenden Punkte des Bildes *ab* herkämen, wie dies schon oben gezeigt wurde; ein hinter der Linse befindliches Auge wird aber den Gegenstand durch die Linse deutlich sehen können, wenn sich das Bild *ab* in der Weite des deutlichen Sehens befindet; in diesem Falle aber liegt der Gegenstand selbst dem Auge weit näher, ohne die Linse würde man ihn also nicht mehr deutlich sehen können. Die vergrößernde Kraft der Linse ist also im Wesentlichen darin zu suchen, daß sie es möglich macht, den Gegenstand dem Auge sehr nahe zu bringen, wodurch denn natürlich auch der Sehwinkel vergrößert wird.

Um die durch die Luppe hervorgebrachte Vergrößerung zu bestimmen, müssen wir die Größe des Sehwinkels, unter welchem das Bild *ab* dem Auge erscheint, wenn es sich in der Entfernung des deutlichen Sehens befindet, mit

der Größe des Sehwinkels vergleichen, unter welchem der Gegenstand selbst erscheinen würde, wenn er eben so weit vom Auge entfernt wäre.

Genau läßt sich der Winkel, unter welchem das Bild ab erscheint, nur dann ermitteln, wenn die Entfernung des Glases vom Kreuzungspunkte im Auge bekannt ist; da man aber das Auge dicht hinter das Glas hält und die Dicke der Linse selbst unbedeutend ist, so kann man ohne großen Fehler den Kreuzungspunkt mit dem Mittelpunkte o der Linse zusammenfallend annehmen; unter dieser Voraussetzung ist nun die Vergrößerung leicht zu berechnen.

Von o aus gesehen, erscheint der Gegenstand AB und das Bild ab unter gleichem Gesichtswinkel; wir finden also die Vergrößerung, wenn wir den Gesichtswinkel, unter welchem AB erscheint, mit demjenigen vergleicht, unter welchem derselbe Gegenstand erscheinen würde, wenn er bis in die Weite des deutlichen Sehens von o entfernt, wenn er also an die Stelle des Bildes ab gesetzt wäre. Da die scheinbare Größe eines Gegenstandes seiner Entfernung vom Auge umgekehrt proportional ist, so verhält sich der Gesichtswinkel AoB zu dem Winkel, unter welchem AB von o aus betrachtet erscheinen würde, wenn dieser Gegenstand bis ab fortgerückt wäre, umgekehrt wie die Entfernungen des Gegenstandes AB und des Bildes ab von o. Bezeichnen wir die Entfernung des Bildes von o mit d, die Entfernung des Gegenstandes AB von o mit x, so ist die Vergrößerung $\frac{d}{x}$, wo für d die Weite des deutlichen Sehens zu setzen ist.

Nehmen wir an, das Bild befände sich in der Weite des deutlichen Sehens, der Gegenstand aber im Brennpunkte der Linse, so wäre die Vergrößerung $\frac{d}{f}$, wenn f die Brennweite des Glases darstellt. Dieser Ausdruck $\frac{d}{f}$ giebt uns nun freilich nicht den wahren Werth der Vergrößerung an, er macht aber ein annähernd richtiges Urtheil über die Vergrößerung der Luppe möglich.

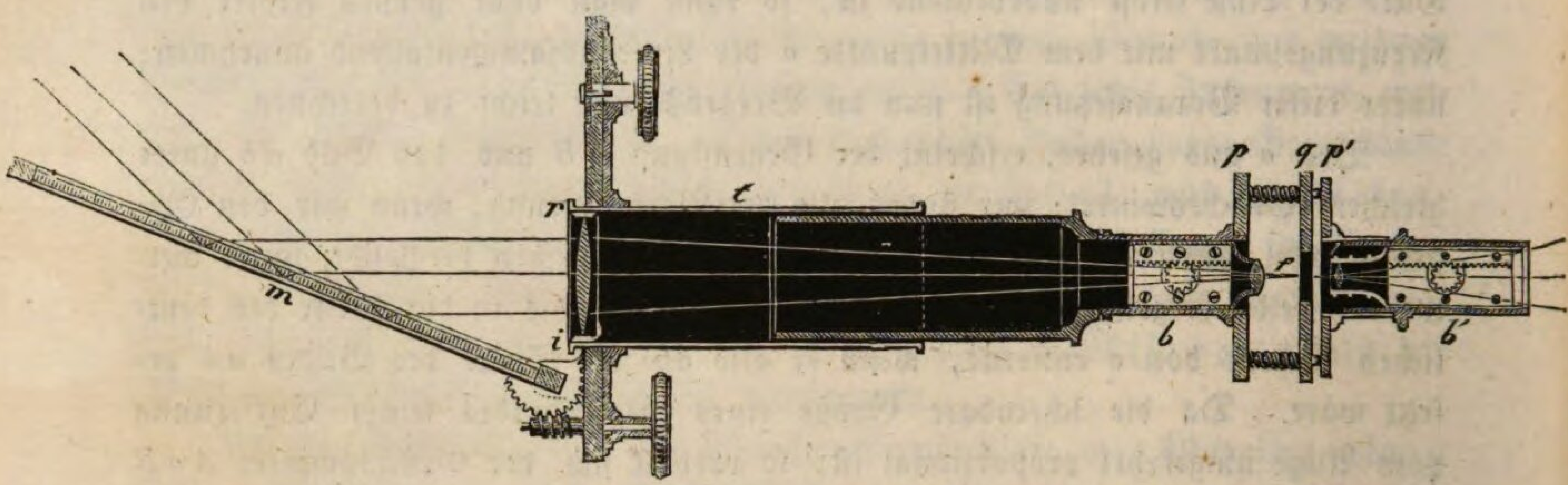
Wenn das Bild ab in der Entfernung d entstehen soll, so muß sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite befinden, x ist also jedenfalls kleiner als f, der wahre Werth der Vergrößerung ist also jedenfalls noch etwas größer als $\frac{d}{f}$.

Wenn z. B. die Weite des deutlichen Sehens 10 Zoll, die Brennweite der Linse 2 Zoll ist, so wird die Vergrößerung noch etwas mehr als $\frac{10}{2}$, d. h. noch etwas mehr als 5 betragen.

Je kleiner der Werth von f wird, d. h. je geringer die Brennweite der Linse ist, desto kleiner wird auch der Werth von x, desto größer der Werth von $\frac{d}{x}$, desto stärker ist also die Vergrößerung. Eine Luppe von kurzer Brennweite vergrößert also stärker als eine solche von größerer Brennweite.

141 **Das Sonnenmikroskop.** Dieses Instrument, dessen Wirkung zu den interessantesten und instructivsten in der Optik gehört, wird in den Laden eines dunklen Zimmers eingeschraubt, so daß der Spiegel *m* außerhalb desselben die Sonnenstrahlen durch die Röhre *t* in den dunklen Raum hineinwirft.

Fig. 321.



Die Linse *i r* macht die Strahlen etwas convergirend, eine zweite Linse *f* vermehrt aber noch diese Convergenz, so daß die Strahlen in einem Brennpunkte vereinigt werden, welcher sich sehr nahe bei dem, dem Versuche zu unterwerfenden Objecte befindet. Damit dies nun jederzeit möglich sey, muß die Linse beweglich gemacht werden; die Bewegung wird durch ein Getriebe hervorgebracht, dessen Knopf sich außerhalb der Röhre befindet, und welches in eine kleine gezahnte Stange eingreift, welche an der Fassung der Linse *f* befestigt ist.

Die zwischen Glasplatten oder auf Glasplatten befestigten Objecte werden nun zwischen die Metallplatten *p'* und *q* gebracht. Da die Platte *q* durch Federn gegen *p'* gedrückt wird, so werden die Objectschieber durch diesen Druck festgehalten, so daß sie nicht herabfallen.

Ist nun so das Object gehörig ajustirt und beleuchtet, so ist es leicht, ein vergrößertes Bild davon zu erhalten. Dazu dient nämlich die Linse *l*, welche in der That die Objectivlinse ist. An der Fassung dieser Linse ist eine gezahnte Stange befestigt, in welche ein Getriebe eingreift, wodurch die Linse *l* nach Belieben verschoben werden kann. Man nähert oder entfernt nun die Linse von dem Gegenstande, bis man endlich ein scharfes helles Bild auf einer weißen Wand, einem Leinentuche oder einem Papierschirme in einer Entfernung von 10, 15 bis 20 Fuß erhält. Da hier ein wirkliches Bild entsteht, so versteht sich von selbst, daß das Object jenseits des Brennpunktes der Linse *l* sich befinden muß. Man kann die Vergrößerung berechnen, wenn man die Entfernung des Gegenstandes von der Linse in die Entfernung des Bildes von derselben dividirt. Will man aber die Vergrößerung direct beobachten, so muß man als Object ein Glasmikrometer anwenden, dessen Theilung eine bekannte Größe hat, und dann die Größe der Abtheilungen in dem Bilde messen.

Man hat auch ähnliche Mikroskope construirt, in denen das Licht der

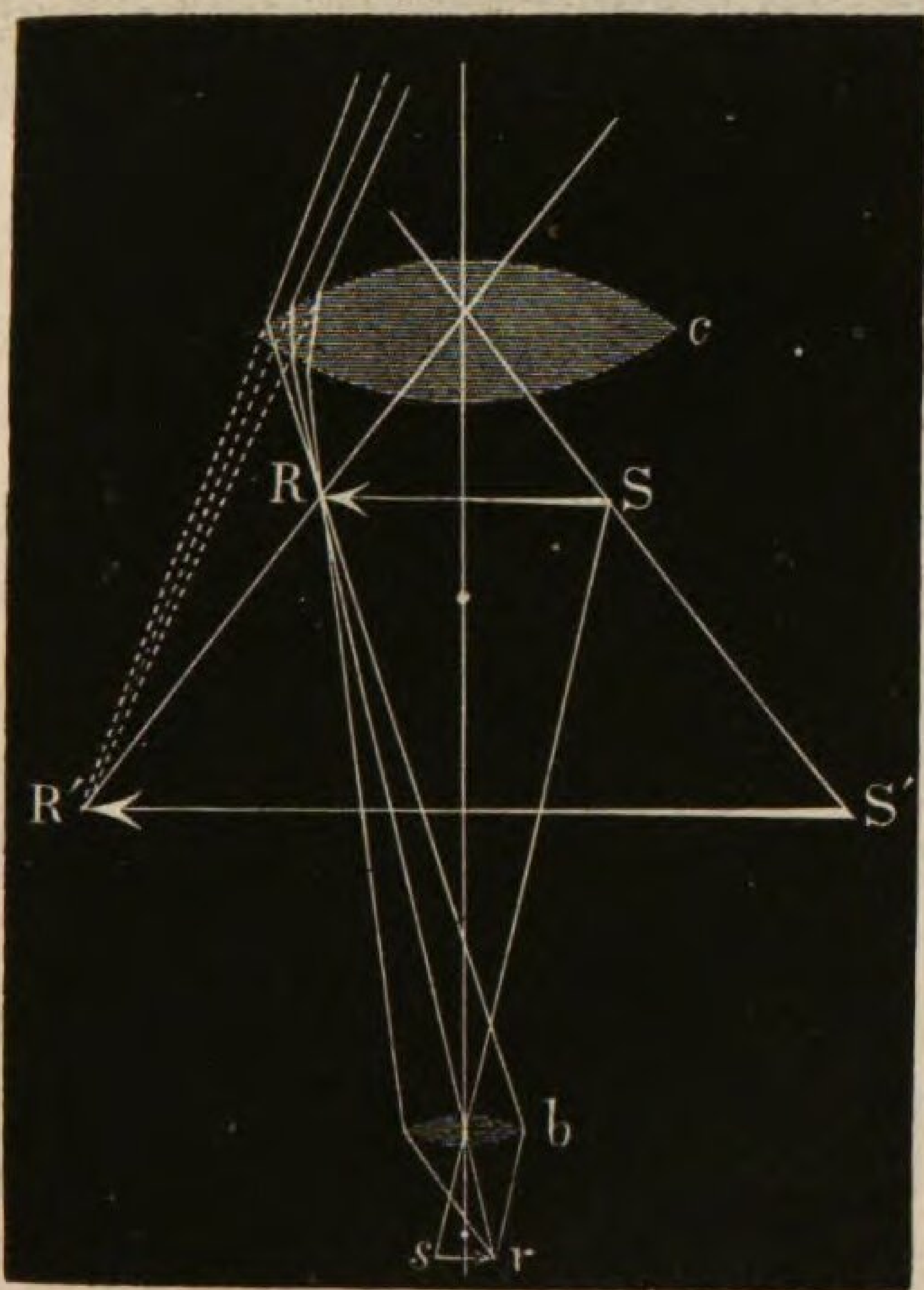
Sonne durch künstliches Licht, etwa durch das Licht eines im Knallgasgebläse glühend gemachten Kalkstückchens (Drummond'sches Kalklicht), oder auch nur durch das Licht einer intensiv leuchtenden Lampe ersetzt ist. Die Vergrößerung muß um so geringer seyn, je weniger intensiv das beleuchtende Licht ist.

Die Zauberlaterne (laterna magica) beruht auf denselben Principien, nur sind die Gegenstände in größeren Dimensionen auf Glas gemalt und werden durch das Licht einer Lampe erleuchtet, die höchstens eine 15= bis 20fache Vergrößerung erlaubt.

Das zusammengesetzte Mikroskop. Die Principien, auf welchen die 142
Construction aller, wenn auch in ihrer sonstigen Einrichtung noch so sehr abweichenden Mikroskopen beruht, sind folgende:

1) Die Gegenstände, welche man dem Versuche unterwerfen will, befinden sich nahe bei einer Sammellinse *b* von kurzer Brennweite, und zwar etwas jenseits des Brennpunktes. Diese Linse, sie mag nun einfach oder zusammengesetzt, achromatisch oder nicht seyn, wird die Objectivlinse oder das Objectiv des Mikroskops genannt.

Fig. 322.



2) Durch das Objectiv *b* wird nun von dem kleinen Gegenstande *rs* ein verkehrtes vergrößertes Bild *RS* entworfen und dieses Bild gleichsam durch eine zweite Linse, das Augenglas oder das Ocular, betrachtet, welches hier als Luppe dient, so daß der Beobachter statt des ersten Bildes *RS* das Bild *R'S'* sieht.

Die von *r* ausgehenden Strahlen divergiren also nach ihrem Durchgang durch das Instrument so, als ob sie von *R'*, die von *s* ausgehenden so, als ob sie von *S'* herkämen.

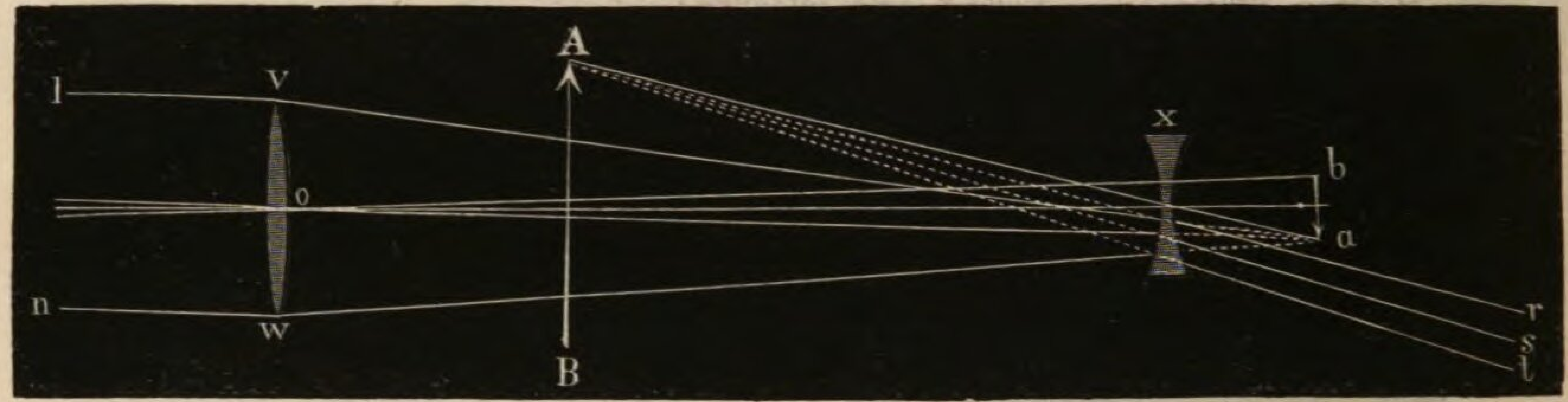
So ist denn jedes dioptrische Mikroskop im Wesentlichen aus einem Objectiv und einem Ocular zusammengesetzt, und die Vergrößerung des Mikroskops ist das Product der Vergrößerungen, welche jedes dieser Gläser hervorbringt. Wenn z. B. das Objectiv im Durchmesser 5mal, das Ocular aber 10mal vergrößerte, so würde ein solches Mikroskop den Durchmesser der Gegenstände 50mal, die Oberfläche also 2500mal vergrößern.

Dioptrische Fernröhre. Auch die Fernröhre, deren Zweck es ist, 143
entfernte Gegenstände vergrößert zu zeigen, bestehen aus einem dem Gegenstande zugekehrten Objectiv, einer Linse von größerem Durchmesser und größerer Brennweite, welche wo möglich achromatisch seyn soll, und einem Ocular, durch welches der Beobachter hindurchschaut. Die verschiedenen Arten der diop=

trischen Fernröhre unterscheiden sich nur durch die verschiedene Einrichtung des Oculars: Bei dem Galiläi'schen Fernrohre besteht das Ocular aus einer einfachen Zerstreuungslinse; das Ocular des astronomischen Fernrohrs hat eine oder zwei Sammellinsen, das Ocular des Erdfernrohrs endlich hat deren vier.

Die Einrichtung des holländischen oder Galiläi'schen Fernrohrs ist Fig. 323 dargestellt. *VW* ist das Objectiv, welches in *ab* ein verkehrtes Bild entwerfen würde, wenn die Strahlen nicht schon vorher durch das Hohlglas *X* aufgefangen würden. Nun aber wird das Ocular so gestellt, daß die Entfernung

Fig. 323.

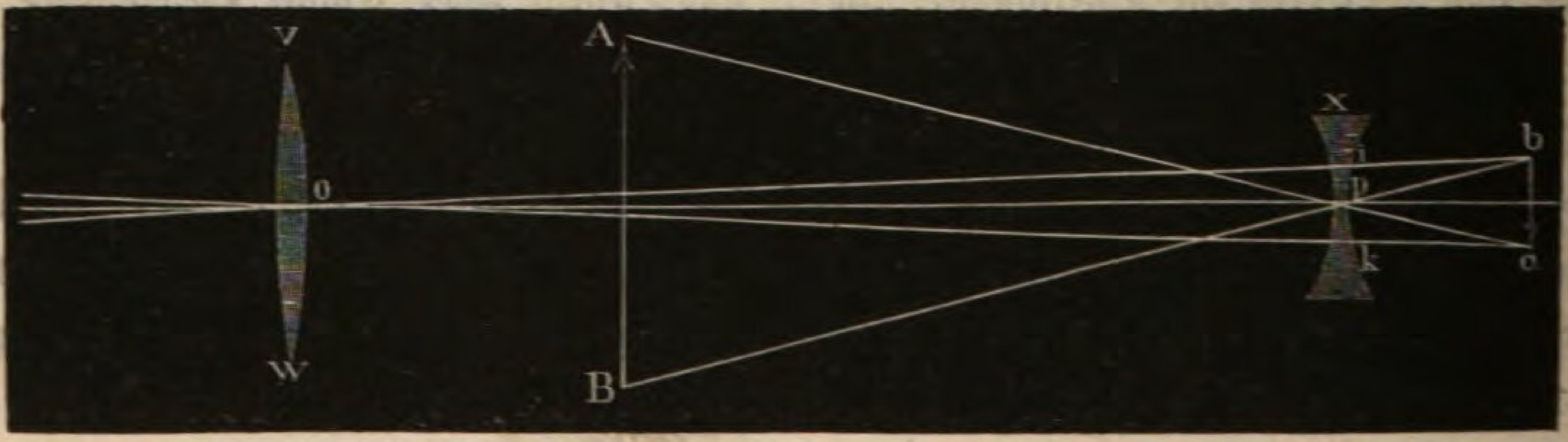


des Bildes *ab* von demselben etwas größer ist als die Zerstreuungsweite des Hohlglases, folglich werden alle nach einem Punkte des Bildes *ab* convergirenden Strahlen durch das Hohlglas so gebrochen, daß sie nach ihrem Durchgange durch dasselbe so divergiren, als ob sie von einem Punkte vor dem Glase herkämen.

In unserer Figur kann man den Lauf des Strahlenbündels verfolgen, welches, von dem obersten Punkte des entfernten Gegenstandes ausgehend, durch das Objectiv *VW* nach *a* hin convergirend gemacht wird, und dessen Strahlen endlich, aus dem Ocular austretend, sich in einer Richtung fortpflanzen, als ob sie von *A* ausgegangen wären.

Die durch dies Fernrohr hervorgebrachte Vergrößerung ist leicht zu berechnen, wenn man die Brennweite des Objectivs und die Zerstreuungsweite des Oculars kennt. Der Winkel, unter welchem der Gegenstand ohne Fernrohr erscheinen würde, ist gleich dem Winkel, unter welchem das Bild *ab* von dem Mittelpunkte des Objectivs aus gesehen erscheint, also gleich dem Winkel, *boa* Fig. 324; denken wir uns nun das Auge in den Mittelpunkt *p* des Oculars versetzt, so

Fig. 324.



erscheint, durch das Fernrohr gesehen, der Gegenstand unter dem Winkel ApB, welcher dem Winkel bpa gleich ist; um zu bestimmen, wie vielmal das Fernrohr vergrößert, haben wir also nur zu ermitteln, wie vielmal der Winkel bpa größer ist als der Winkel boa.

Die Entfernung des Bildes ab vom Objectiv ist gleich der Brennweite f desselben, wenn der Gegenstand sehr weit entfernt ist; die Entfernung des Bildes ab vom Ocular ist aber nur unmerklich größer als die Zerstreuungsweite f' dieses Glases, und wir können also ohne merklichen Fehler die Entfernung des Bildes ab von p gleich f' setzen. Nun aber verhalten sich die Winkel bpa und boa sehr nahe umgekehrt wie diese Entfernungen, also

$$boa : bpa = f' : f,$$

oder

$$\frac{bpa}{boa} = \frac{f}{f'}.$$

Setzen wir den Winkel boa, unter welchem der Gegenstand ohne Fernrohr erscheint, $= 1$, so ist der Winkel, unter welchem er in dem Fernrohre gesehen wird,

$$bpa = \frac{f}{f'},$$

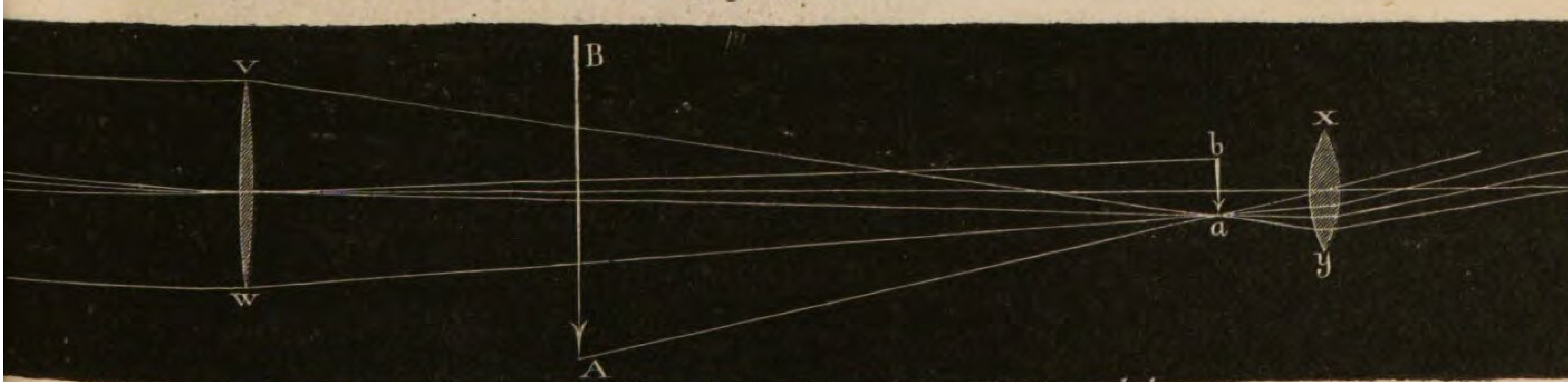
d. h. man findet die Vergrößerung, wenn man die Brennweite des Objectivs durch die Zerstreuungsweite des Oculars dividirt; die Vergrößerung ist also um so größer, je größer die Brennweite des Objectivs und je kleiner die Zerstreuungsweite des Oculars ist.

Die Entfernung der beiden Gläser ist offenbar sehr nahe gleich $f - f'$; wenn man also verschiedene Oculare mit demselben Objectiv verbindet, so wird die Entfernung der beiden Gläser um so größer seyn müssen, je kürzer die Zerstreuungsweite des Oculars, je stärker also die Vergrößerung ist.

Je näher der zu betrachtende Gegenstand rückt, desto weiter rückt ab vom Objectiv weg, desto weiter muß man also das Fernrohr ausziehen.

Bei dem astronomischen Fernrohre kommt das Bild des Oculars wirklich zu Stande, und es wird durch eine einfache oder zusammengesetzte Lupe betrachtet, wie man es Fig. 325 sieht; ab ist das durch das Objectiv VW entworfene verkehrte Bild eines Gegenstandes, welches, durch die Lupe xy betrach-

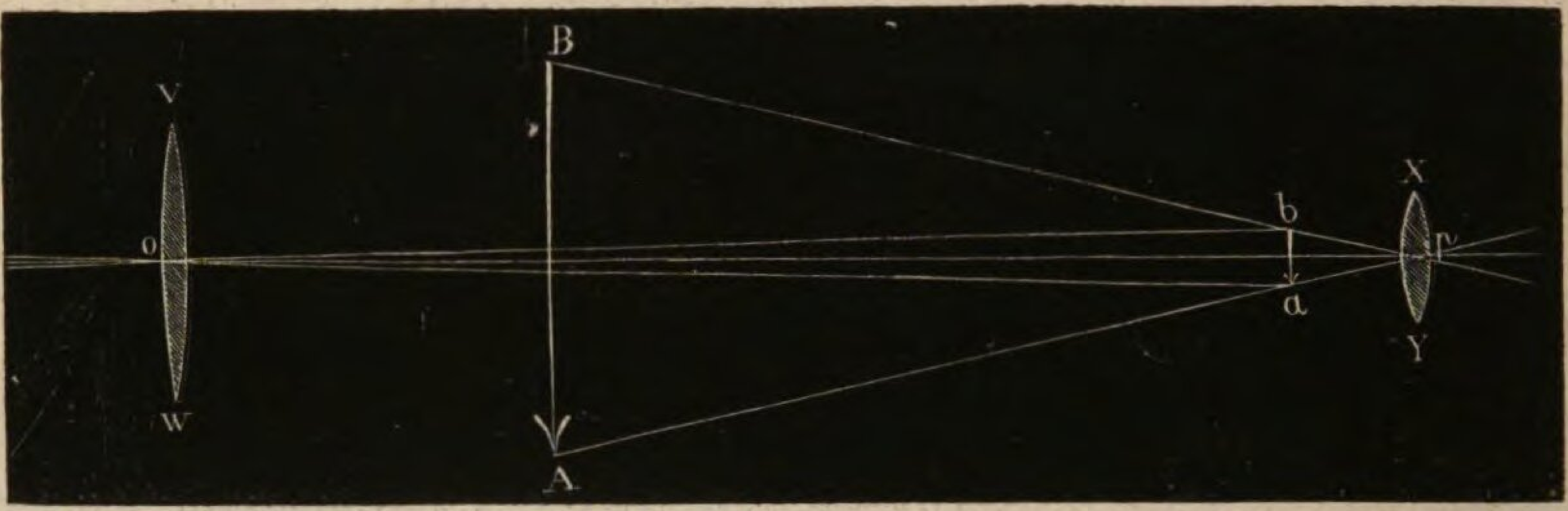
Fig. 325.



tet, in AB vergrößert erscheint. Unsere Figur zeigt den Lauf des von der Spitze des Gegenstandes ausgehenden Strahlenbündels, welches durch das Instrument hindurch geht.

Die Vergrößerung eines solchen Fernrohrs ist leicht zu berechnen, wenn man die Brennweite des Objectivs und des Oculars kennt; denn der Sehwinkel, unter welchem der Gegenstand dem bloßen Auge erscheint, ist gleich dem Winkel, unter welchem das Bild ab von der Mitte o, Fig. 326, des Objectivs gesehen

Fig. 326.



wird; durch das Fernrohr erscheint er aber unter demselben Winkel wie das Bild ab von der Mitte p des Oculars xy aus betrachtet; der eine dieser Winkel verhält sich aber zum anderen umgekehrt wie die Entfernung des Bildes ab vom Objectiv zu der Entfernung desselben vom Ocular; nun aber steht das Bild vom Objectiv um die Brennweite f desselben, vom Ocular aber um die Entfernung f' ab, wenn wir mit f' die Brennweite des Oculars bezeichnen; die durch das Fernrohr hervorgebrachte Vergrößerung ist also $\frac{f}{f'}$.

Die Länge des Fernrohrs ist $f + f'$, d. h. sie ist gleich der Summe der Brennweiten der beiden Gläser.

In der Regel wendet man keine einfache Linse als Ocular an, wie wir dies bis jetzt angenommen haben, sondern eine Combination von zwei Linsen.

Daß man durch ein astronomisches Fernrohr die Gegenstände verkehrt sieht, ist klar; denn durch das Objectiv wird ein verkehrtes Bild des entfernten Gegenstandes entworfen, und dieses Bild wird dadurch, daß man es durch eine Lupe betrachtet, nicht umgekehrt.

Die Helligkeit des Bildes hängt von der Größe des Objectivs, die Größe des Gesichtsfeldes von dem Ocular ab.

Um die Gegenstände genau einvisiren zu können, muß in dem astronomischen Fernrohre ein Fadenkreuz angebracht seyn; es befindet sich dies genau an der Stelle, an welcher durch das Objectiv das Bild des zu betrachtenden Gegenstandes entsteht.

Beim Betrachten irdischer Gegenstände ist es unangenehm, Alles verkehrt

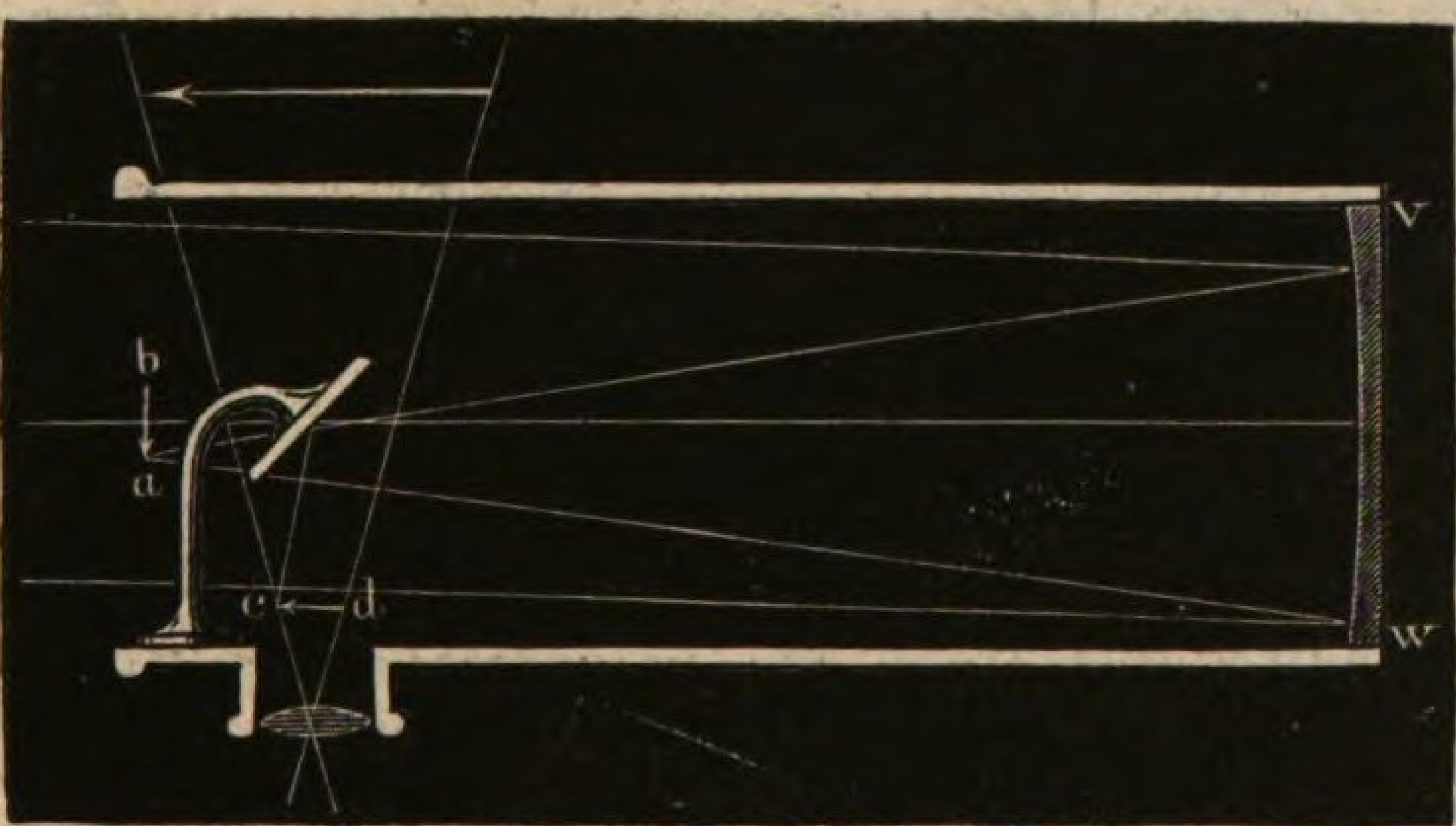
zu sehen, was bei astronomischen Beobachtungen, so wie auch bei Vermessungen gleichgültig ist. Um nun bei starker Vergrößerung die Gegenstände doch noch aufrecht sehen zu können, hat man das Ocular des astronomischen Fernrohrs durch eine Röhre ersetzt, welche in der Regel vier Convexlinsen enthält, und so erhält man das Erdfernrohr. Die vier Linsen in der Ocularröhre bilden gewissermaßen ein nicht gar stark vergrößerndes zusammengesetztes Mikroskop, durch welches man das verkehrte Bild wieder verkehrt, also in aufrechter Stellung sieht.

Die Vergrößerung des Galiläischen und des astronomischen Fernrohrs läßt sich, wie wir gesehen haben, aus der Brennweite der Gläser leicht berechnen; da aber diese Brennweite selbst erst durch einen Versuch ermittelt werden muß, so ist es vorzuziehen, die Vergrößerung der Fernröhre unmittelbar durch den Versuch zu bestimmen. Ganz einfach geschieht dies bei nicht zu starker Vergrößerung auf folgende Weise: Man stelle in einiger Entfernung vom Fernrohre einen getheilten Stab, etwa eine Latte, wie man sie zum Feldmessen braucht, auf und betrachte denselben gleichzeitig mit dem einen Auge direct, mit dem anderen durch das Fernrohr; man sieht auf diese Weise, wie viel Abtheilungen des mit bloßem Auge gesehenen Maßstabes auf eine durch das Fernrohr vergrößerte Abtheilung fallen, und erhält so unmittelbar den Werth der Vergrößerung. Man kann zu dem eben angegebenen Verfahren auch die Ziegelreihen eines Daches anwenden.

Spiegelteleskope. Bevor man achromatische Objectivlinsen machen 144
konnte, war der Umstand, daß der Brennpunkt einer einfachen Linse nicht für alle farbigen Strahlen derselbe ist, für die Reinheit und Schärfe der Bilder sehr nachtheilig. Man suchte dies dadurch zu vermeiden, daß man das erste Bild der entfernten Gegenstände nicht durch Linsen, sondern durch metallene Hohlspiegel erzeugte, und so entstanden die Spiegelteleskope.

Fig. 327 stellt ein Newton'sches Spiegelteleskop dar. Der Hohlspiegel *VW* würde von dem entfernten Gegenstand ein Bild in *ab* entwerfen; ehe jedoch die Strahlen hierher gelangen, werden sie von einem Planspiegel, der 45° gegen die Axe des Rohres geneigt ist, seitwärts reflectirt, so daß das Bild wirklich in *cd* entsteht. Dieses Bild wird nun durch das Ocular betrachtet.

Fig. 327.



Beim Gregory'schen Teleskope, Fig. 328 s. f. S, sowohl, als auch beim Cassegrain'schen, Fig. 329, ist der Objectivspiegel in der Mitte durchbohrt und hinter dieser Oeffnung das Ocular angebracht. Die vom Objectivspiegel

kommenden Strahlen werden beim einen durch einen kleinen Hohlspiegel, beim anderen durch einen kleinen Convexspiegel, der sich in der Axe des Rohres befindet, gegen das Ocular hin gespiegelt.

Fig. 328.

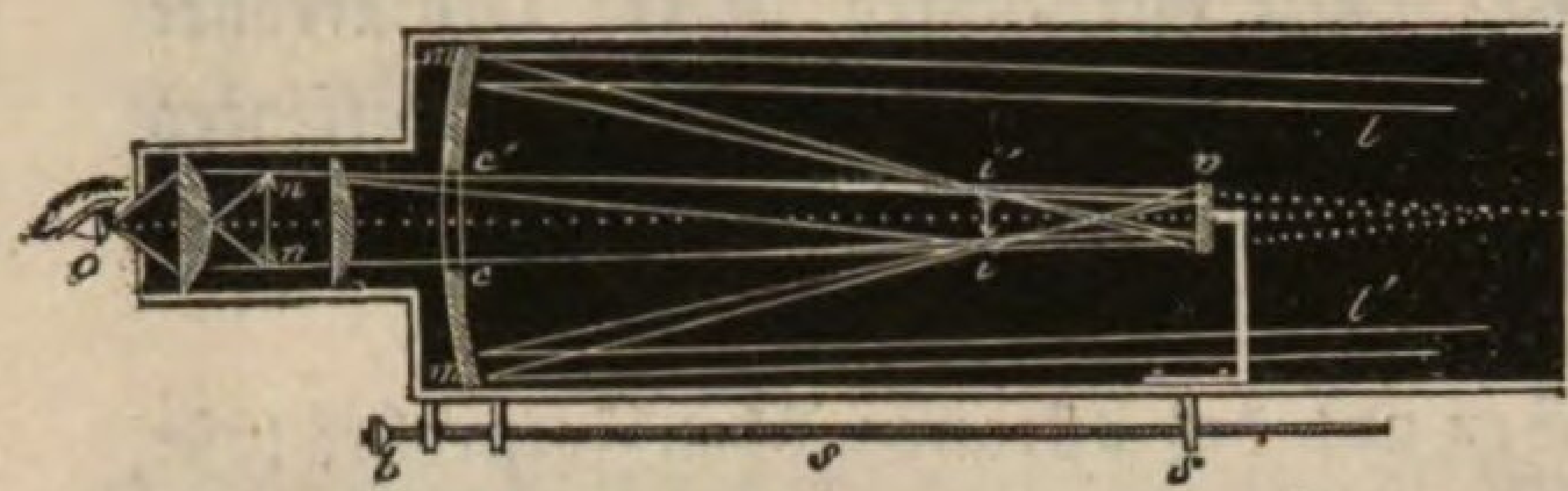
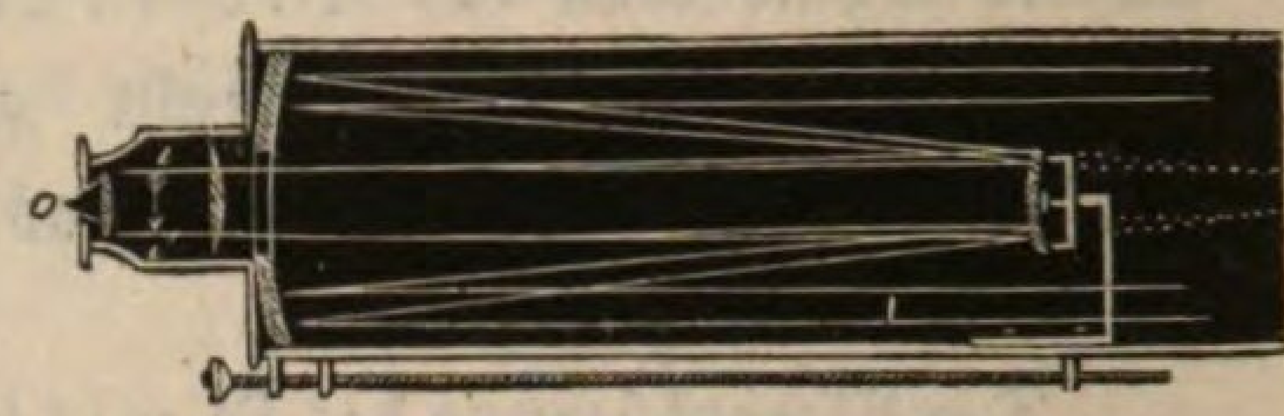


Fig. 329.



In Folge der Erfindung achromatischer Objective sind die Spiegelteleskope sehr außer Gebrauch gekommen; es mögen deshalb hier auch diese kurzen Andeutungen genügen.

Fünftes Kapitel.

Interferenzerscheinungen.

145 Um die verschiedenen Lichterscheinungen zu erklären, sind zwei verschiedene Hypothesen aufgestellt worden, die Emissions- oder Emanationstheorie und die Vibrations- oder Undulationstheorie.

Die Emissionstheorie nimmt an, daß es eine eigenthümliche Lichtmaterie gebe, und daß ein leuchtender Körper nach allen Seiten hin Theilchen dieser feinen Materie mit so ungeheurer Geschwindigkeit aussende, daß ein solches Lichttheilchen in 8 Minuten und 13 Secunden von der Sonne zur Erde gelangt. Diese Lichtmaterie muß man natürlich als äußerst fein und den Wirkungen der Schwere nicht unterworfen, also als imponderabel annehmen. Die Verschiedenheit der Farben rührt von einer Verschiedenheit in der Geschwindigkeit her; die Reflexion ist nach dieser Ansicht dem Abprallen elastischer Körper analog. Um nach dieser Theorie die Brechung zu erklären, müßte man annehmen: 1) daß sich in den durchsichtigen Körpern hinreichend große Zwischenräume befinden, um den Lichttheilchen den Durchgang zu gestatten, und 2) daß die wägbaren Moleküle auf die Lichttheilchen eine anziehende Kraft ausüben, welche, combinirt mit der einmal erlangten Geschwindigkeit der Lichttheilchen, ihre Ablenkung bewirkt.

Die Vibrationstheorie nimmt an, daß sich das Licht durch die Schwingungen der Theilchen eines unwägbaren Stoffes fortpflanzt, welcher den Namen Aether führt. Nach dieser Theorie ist das Licht etwas dem Schalle

Aehnliches; der Schall wird aber durch die Schwingungen der wägbaren Materie, das Licht durch die Schwingungen eines Aethers fortgepflanzt. Der **Aether** erfüllt den ganzen Weltraum, da das Licht alle Räume des Himmels durchdringt. Der Aether ist aber nicht bloß in den sonst leeren Räumen verbreitet, welche die Gestirne trennen, er durchdringt alle Körper und füllt die zwischen den wägbaren Atomen befindlichen Räume aus.

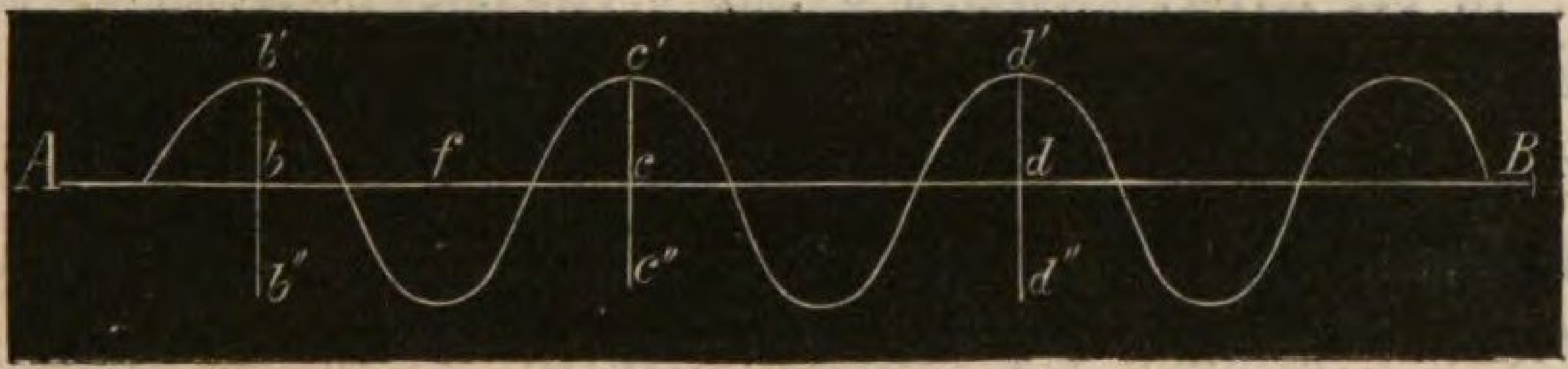
Wo der **Aether** in Ruhe ist, herrscht vollkommene Finsterniß; an einer Stelle gleichsam erschüttert, pflanzen sich die Lichtwellen nach allen Seiten hin fort, wie sich die Schwingungen einer Saite in einer ruhigen Atmosphäre weithin verbreiten. Das Licht, welches erst durch eine Bewegung entsteht, ist also wohl von dem Aether selbst zu unterscheiden, wie die Vibrationsbewegung, welche den Schall hervorbringt, von den oscillirenden Theilchen der wägbaren Materie unterschieden wird.

Lange Zeit hindurch zählten beiden Theorien Anhänger unter den Physikern. **Newton** hatte die Emanationstheorie aufgestellt, **Huyghens** ist als Schöpfer der Undulationstheorie zu betrachten. Das gründliche Studium der Lichterscheinungen, welche in den folgenden Paragraphen besprochen werden, hat der Undulationstheorie einen entschiedenen Sieg verschafft; denn diese Erscheinungen lassen sich sehr einfach durch die Annahme von Lichtwellen, nicht aber durch die Emissionstheorie erklären.

Elemente der Vibrationstheorie. Die Theilchen eines leuchtenden 146
Körpers vibriren auf ähnliche Weise, wie dies bei den schallenden Körpern der Fall ist, nur sind die Lichtvibrationen ungleich schneller als die Schallschwingungen, dann aber werden sie auch nicht durch die wägbare Materie selbst, sondern durch den Lichtäther fortgepflanzt.

Wenn sich ein Lichtstrahl in der Richtung von *A* nach *B*, Fig. 330, ver-

Fig. 330.



breitet, so vibriren alle Aethertheilchen, welche im Zustande des Gleichgewichts auf der geraden Linie *AB* liegen würden, in Richtungen, welche rechtwinklig auf *AB* stehen, ungefähr so, wie die Theile eines gespannten Seiles schwingen, wenn man an dem einen Ende einen kräftigen Schlag gegen dasselbe geführt hat. Die Curve in Fig. 330 stellt die gegenseitigen Stellung der vibrirenden Moleküle in einem bestimmten Momente der Bewegung dar.

Betrachten wir die Schwingungen eines Aethermoleküls etwas genauer. Das Theilchen, dessen Gleichgewichtslage *b* ist, vibrirt beständig zwischen den Punkten *b'* und *b''*. In *b'* ist seine Geschwindigkeit Null; je mehr sich aber

das Theilchen der Gleichgewichtslage nähert, desto mehr wächst seine Geschwindigkeit, welche ihr Maximum in dem Momente erreicht, in welchem das Molekül die Gleichgewichtslage passirt; von nun an nimmt die Geschwindigkeit wieder ab, bis sie endlich in b'' wieder Null wird, worauf dann die Bewegung nach entgegengesetzter Richtung beginnt.

Obgleich sich das Licht mit außerordentlicher Geschwindigkeit fortpflanzt, so geschieht diese Fortpflanzung doch nicht momentan; die Vibrationen eines Aethermoleküls theilen sich also auch nicht momentan den in der Richtung des Strahls ihm folgenden Molekülen mit. Stellen wir uns vor, die ganze Reihe von Molekülen auf der Linie AB sey in Ruhe. Wenn nun das Molekül in b in einem bestimmten Momente seine Vibrationen beginnt, so werden alle weiter nach B hin liegenden Moleküle später zu vibriren beginnen, und zwar um so später, je weiter sie von b liegen; während das Molekül b eine vollständige Oscillation macht, d. h. während es von b' nach b'' und wieder zurück nach b' sich bewegt, wird sich die Bewegung bis zu irgend einem Molekül c fortpflanzen, so daß dieses Molekül seine erste Vibration in demselben Momente beginnt, in welchem b seine zweite anfängt. Von nun an werden die Moleküle b und c stets in gleichen Schwingungszuständen sich befinden, d. h. sie werden, gleichzeitig nach derselben Seite hin sich bewegend, die Gleichgewichtslage passiren, gleichzeitig das Maximum der Ausweichung auf der einen und auf der anderen Seite von AB erreichen.

Die Entfernung bc zweier Aethermoleküle, welche sich stets in gleichen Schwingungszuständen befinden, heißt, wie wir schon früher gesehen haben, eine **Wellenlänge**. Wenn cd auch eine Wellenlänge ist, so wird das Molekül d seine erste Oscillation in demselben Augenblicke beginnen, in welchem c seine zweite und b seine dritte Oscillation beginnt; d wird von nun an mit c und b sich stets in gleichen Schwingungszuständen befinden.

Wenn f in der Mitte zwischen b und c liegt, d. h. wenn es um eine halbe Wellenlänge von b entfernt ist, so befindet sich das Molekül in f stets in Schwingungszuständen, welche denen der Moleküle in b und c entgegengesetzt sind. Wenn b und c das Maximum der Ausweichung oberhalb AB erreichen, so erreicht f das Maximum der entgegengesetzten Seite. Das Molekül f passirt mit b und c gleichzeitig die Gleichgewichtslage, allein in entgegengesetzter Richtung sich bewegend.

Wenn zwei Aethertheilchen auf dem Wege eines Lichtstrahls um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge von einander entfernt sind, so sind sie stets von gleichen, aber entgegengesetzten Geschwindigkeiten afficirt. Dasselbe gilt von solchen Theilchen, die um $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$, $\frac{7}{2}$ u. s. w. Wellenlängen von einander abstehen.

Die **Wellenlänge** ist für die verschiedenen Farben nicht gleich; am größten ist die Wellenlänge der rothen, am kleinsten die Wellenlänge der violetten Strahlen. Wie es möglich war, die Wellenlänge der verschiedenfarbigen

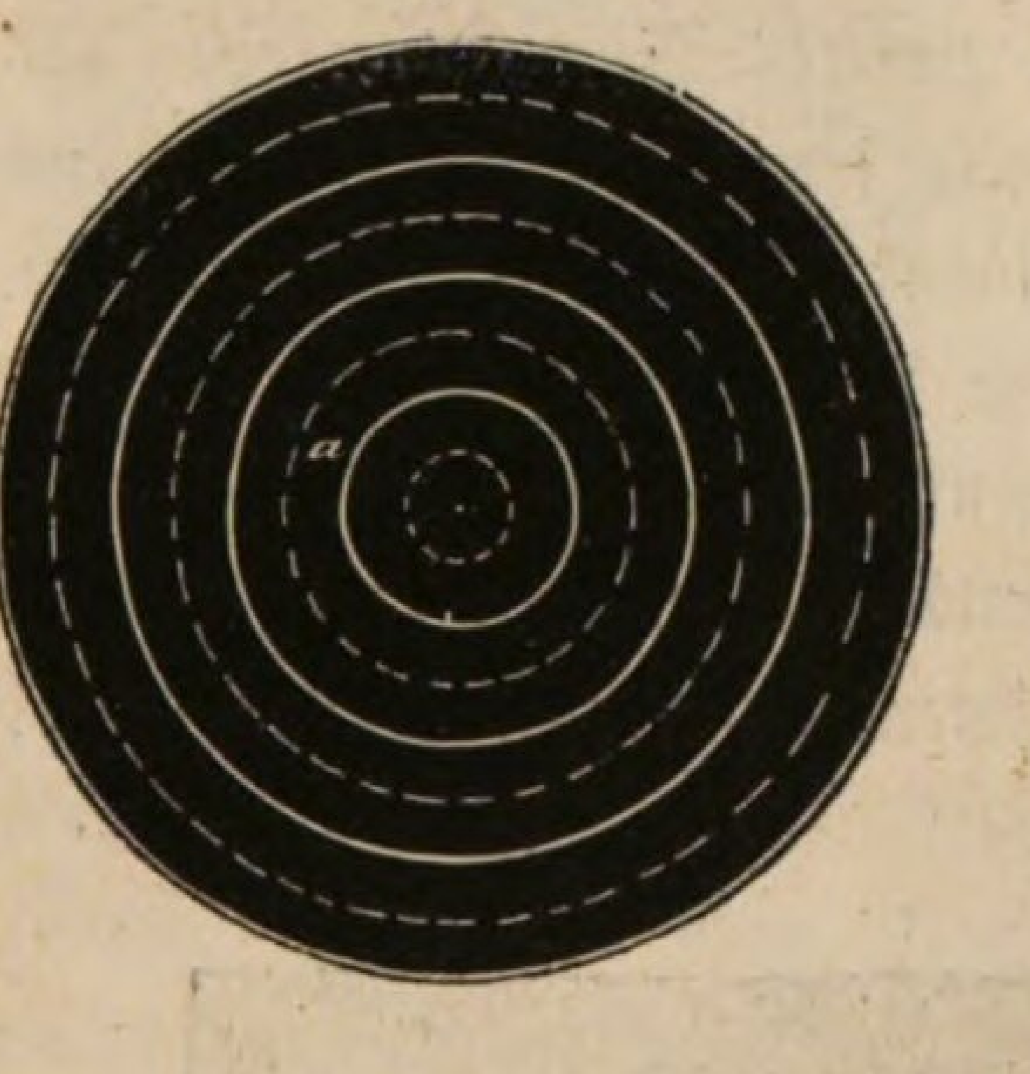
Strahlen mit außerordentlicher Genauigkeit zu bestimmen, können wir hier nicht weiter anführen.

Mit der ungleichen Wellenlänge hängt auch die ungleiche Schwingungsdauer zusammen; die Vibrationen der violetten Strahlen sind die schnellsten, die der rothen dagegen die langsamsten.

Man sieht also, daß beim Lichte die Verschiedenheit der Farben der ungleichen Höhe und Tiefe der Töne entspricht.

Von der Art und Weise, wie sich von einem leuchtenden Punkte aus die Lichtwellen ringsum verbreiten, kann man sich ein recht deutliches Bild machen, wenn man die Wellen betrachtet, welche auf der Oberfläche eines stillstehenden Wassers entstehen, wenn man einen Stein hineinwirft, und die wir auch schon oben betrachtet haben. Von der Stelle aus, an welcher der Stein in das Wasser einsank, verbreiten sich ringsum kreisförmige Wellen. Die Wassertheilchen an der Stelle, an welcher der Stein ins Wasser fiel, gehen abwechselnd auf und nieder, und diese Bewegung pflanzt sich ringsum mit gleicher Geschwindigkeit fort; alle Wassertheilchen also, welche gleichweit von dem Mittelpunkte entfernt sind, werden sich auch in gleichen Schwingungszuständen befinden, d. h. sie werden gleichzeitig ihre höchste und gleichzeitig ihre tiefste Stellung erreichen; es werden sich also concentrische Wellenberge und Wellenthäler bilden, wie dies durch Fig. 331 anschaulich gemacht werden soll. Wenn für einen bestimmten Moment die ausgezogenen Kreise den Wellenbergen, die punktirten aber den Wellenthälern entsprechen, so werden die Wellenberge nach außen hin in der Weise fortschreiten, daß nach einer kurzen Zeit gerade an den punktirten Stellen sich die Wellenberge befinden, die Thäler aber in den ausgezogenen Kreisen.

Fig. 331.



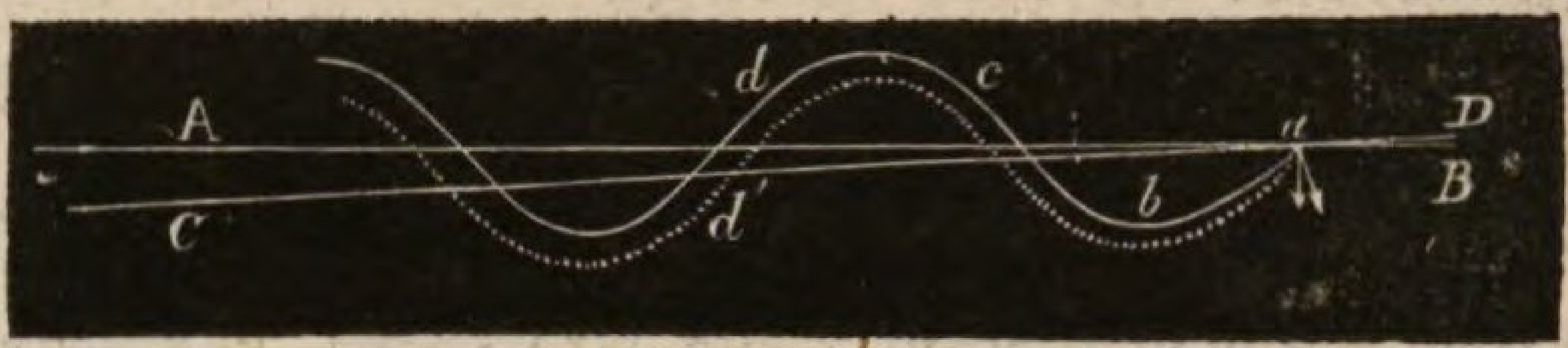
So wie sich die Wasserwellen in concentrischen Kreisen um den Oscillationsmittelpunkt verbreiten, so verbreiten sich die Lichtvibrationen in concentrischen Kugelschichten um die Lichtquelle; die **Oberfläche der Lichtwellen** ist kugelförmig, wenigstens so lange die Elasticität des Aethers nach allen Richtungen hin dieselbe bleibt.

Interferenz der Lichtstrahlen. Wir werden sogleich die Erscheinung 147
kennen lernen, daß durch das Zusammenwirken zweier Lichtstrahlen bald verstärktes Licht, bald aber vollkommene Dunkelheit erzeugt wird.

Eine solche durch das Zusammenwirken zweier Lichtstrahlen hervorgebrachte Verstärkung oder Aufhebung wird mit dem Namen der **Interferenz** der Lichtstrahlen bezeichnet. Die Interferenz der Lichtstrahlen läßt sich folgendermaßen erklären.

In Fig. 332 mögen die Linien *AB* und *CD* zwei elementare Lichtstrahlen darstellen, welche, von einer Lichtquelle ausgehend, auf verschiedenen Wegen zu dem Punkte *a* gelangen und sich hier unter einem sehr spitzen Winkel schneiden. Wenn der Weg, welchen der Lichtstrahl *CD* von der Lichtquelle an bis zu dem Punkte *a* zurückgelegt hat, gerade eben so groß oder um 1, 2, 3 u. s. w.

Fig. 332.



ganze Wellenlängen größer ist, als die Länge von derselben Lichtquelle bis zu dem Punkte *a* auf dem Wege des anderen Strahls, so werden die beiden Strahlen in *a* in der Weise zusammenwirken, wie es die Fig. 332 darstellt.

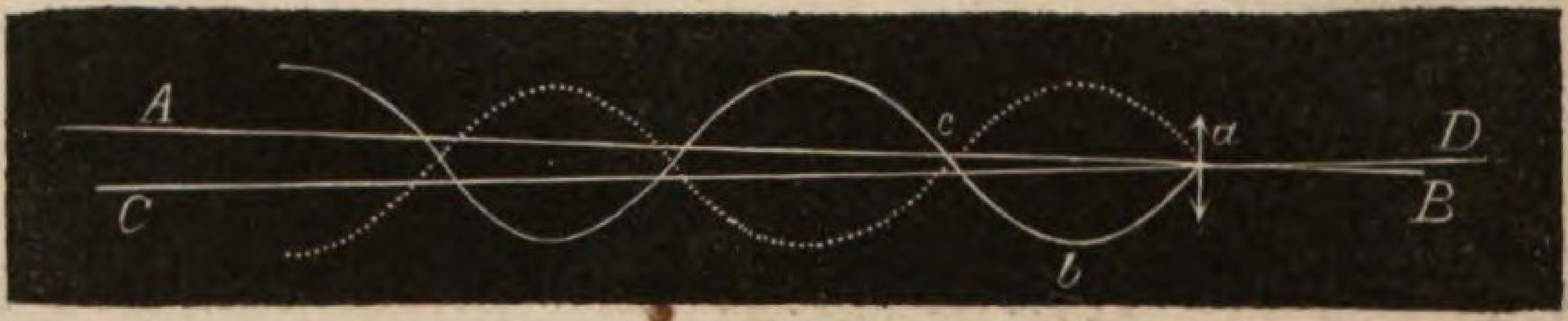
Die Wellenlinie *abcd* u. s. w. stellt für irgend einen Moment die gegenseitige Lage der Aethertheilchen dar, welche den Strahl in der Richtung *AB* fortpflanzen. Das Theilchen *b* hat eben seine äußerste Stellung unterhalb *AB* erreicht, das Theilchen *a* passirt eben die Gleichgewichtslage in der Richtung, welche der kleine Pfeil andeutet.

Die punktirte Wellenlinie zeigt uns den gleichzeitigen Oscillationszustand der Aethertheilchen, welche den Lichtstrahl *CD* fortpflanzen. Wenn beide Strahlen von der Lichtquelle bis zum Punkte *a* gleiche Wege durchlaufen haben, so wird das Theilchen *a* gleichzeitig durch die Vibrationen beider Strahlen auf dieselbe Weise afficirt werden; in dem durch unsere Zeichnung dargestellten Momente wird das Theilchen *a* durch das zweite Wellensystem ebenfalls nach unten getrieben, die Vibrationsintensität ist also doppelt so groß, als wenn seine Bewegung nur durch die Vibrationen des einen Lichtstrahls bedingt wäre.

In derselben Weise müssen sich auch die Vibrationen zweier Lichtstrahlen unterstützen, welche in einem Punkte zusammentreffen, wenn sie in ihrem Gange um irgend ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge von einander abweichen.

Die Fig. 333 versinnlicht das Zusammenwirken zweier Strahlen, von

Fig. 333.



denen der eine dem anderen um eine halbe oder irgend ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge vorausgeeilt ist. Durch die Vibrationen des einen Strahls (die ihm entsprechende Wellenlinie ist ausgezogen, während die dem anderen Strahl entsprechende punktirt ist) wird das Theilchen *a* in demselben Augenblicke nach oben getrieben, in welchem die Vibrationen des anderen Strahls dasselbe mit gleicher Kraft abwärts zu bewegen streben,

die beiden entgegengesetzten Kräfte heben sich also auf, das Theilchen *a* bleibt in Ruhe.

Wir haben bisher nur diejenigen Fälle betrachtet, in welchen der Gangunterschied der interferirenden Strahlen ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge oder ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge beträgt. Wenn der Gangunterschied zwischen diese Gränzen fällt, so wird durch die Interferenz der beiden Strahlen auch eine Wirkung hervorgebracht, welche zwischen den Wirkungen der besprochenen Gränzfälle liegt, d. h. es wird keine vollkommene Vernichtung der Vibrationen, aber auch keine Verdoppelung der Vibrationsintensität eintreten können. Die wirklich hervorgebrachte Vibrationsintensität nähert sich mehr dem einen oder dem anderen dieser Gränzwerthe, je nachdem die Gangunterschiede sich mehr einem ungeraden Vielfachen einer halben Wellenlänge oder einem Vielfachen einer ganzen Wellenlänge nähern.

Wir gehen nun zur Betrachtung derjenigen Erscheinungen über, welche sich auf das Princip der Interferenz zurückführen lassen.

Die Beugung des Lichts. Wenn man das kleine Sonnenbildchen 148
auf einem innen geschwärzten Uhrglase, auf einem polirten Metallknopfe oder einer Thermometerkugel durch eine ganz feine kreisförmige Oeffnung betrachtet, wie man sie etwa mit einer feinen Nadel in ein Kartenblatt machen kann, so sieht man einen hellen runden Fleck umgeben von mehreren farbigen Ringen Fig. 335 stellt diese Erscheinung dar.

Fig. 334.

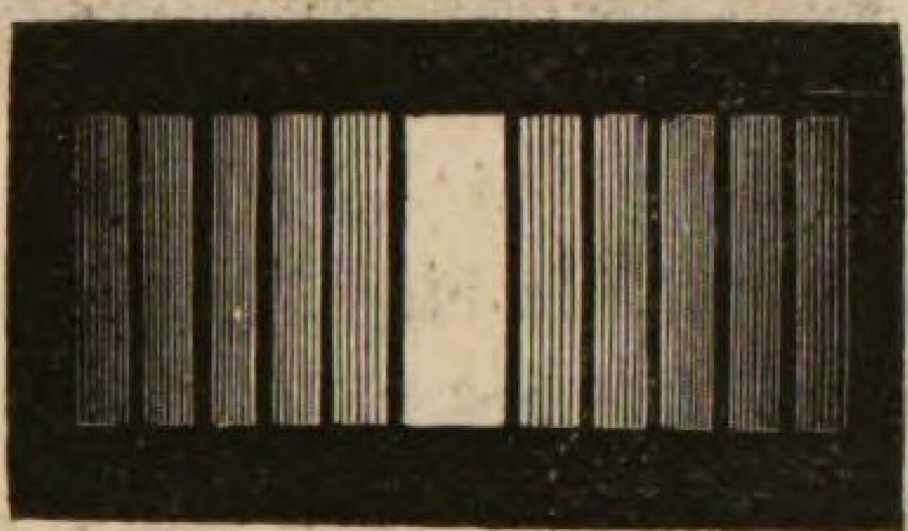
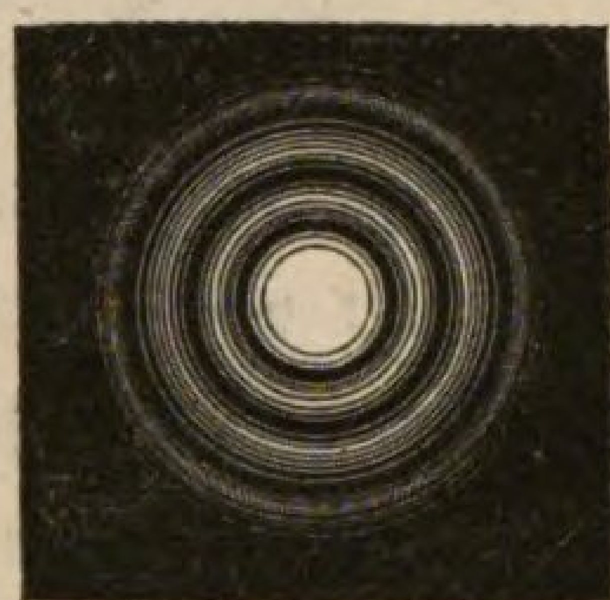


Fig. 335.



Macht man statt des Punktes eine ganz feine geradlinige Spalte in das Kartenblatt, betrachtet man durch diese Spalte die Lichtlinie auf einer innen geschwärzten in die Sonne gelegten Glasröhre, welche dem Spalt parallel ist, so beobachtet man die Erscheinung Fig. 334. In der Mitte des Bildes sieht man einen hellen Streifen; zu beiden Seiten aber schmälere Farbenstreifen, die nach außen hin immer lichtschwächer werden.

Je feiner die kreisförmige Oeffnung und je schmaler die Spalte ist, desto breiter sind im einen Falle die Ringe und im anderen die Streifen.

Am einfachsten wird die Erscheinung, wenn man mit dem Kartenblatte ein einfarbiges Glas, etwa ein rothes, vor's Auge hält; alsdann sieht man, durch die Spalte blickend, in der Mitte einen hellen rothen Streifen, welcher zu beiden Seiten durch einen schwarzen Streifen begränzt ist; zu beiden Seiten

folgen dann mehrere rothe Seitenbilder, welche immer schwächer werden, und deren immer eins vom anderen durch einen schwarzen Streifen getrennt ist, ungefähr wie dies in der untersten Reihe Fig. 336 dargestellt ist.

Die hellen Seitenbilder sowohl wie der helle Streifen in der Mitte sind aber durch die schwarzen Streifen nicht scharf abgegränzt, der Uebergang vom hellen Licht bis zu den dunkelsten Stellen ist allmälig.

Durch ein grünes Glas beobachtet man dieselbe Erscheinung, nur sind die Streifen schmäler, noch schmäler sind sie, wenn man ein violettes Glas anwendet, wie dies Fig. 336 angedeutet ist.

Die Erklärung dieser Erscheinungen kann hier nur kurz angedeutet werden.

Wenn das Licht von einem hinlänglich weit entfernten Punkte senkrecht auf die Ebene des Schirmes *AB* fällt, Fig. 337, in welchem sich die Oeffnung *CD* befindet, so kann man alle in dieser Oeffnung befindlichen Aethertheilchen

Fig. 336.

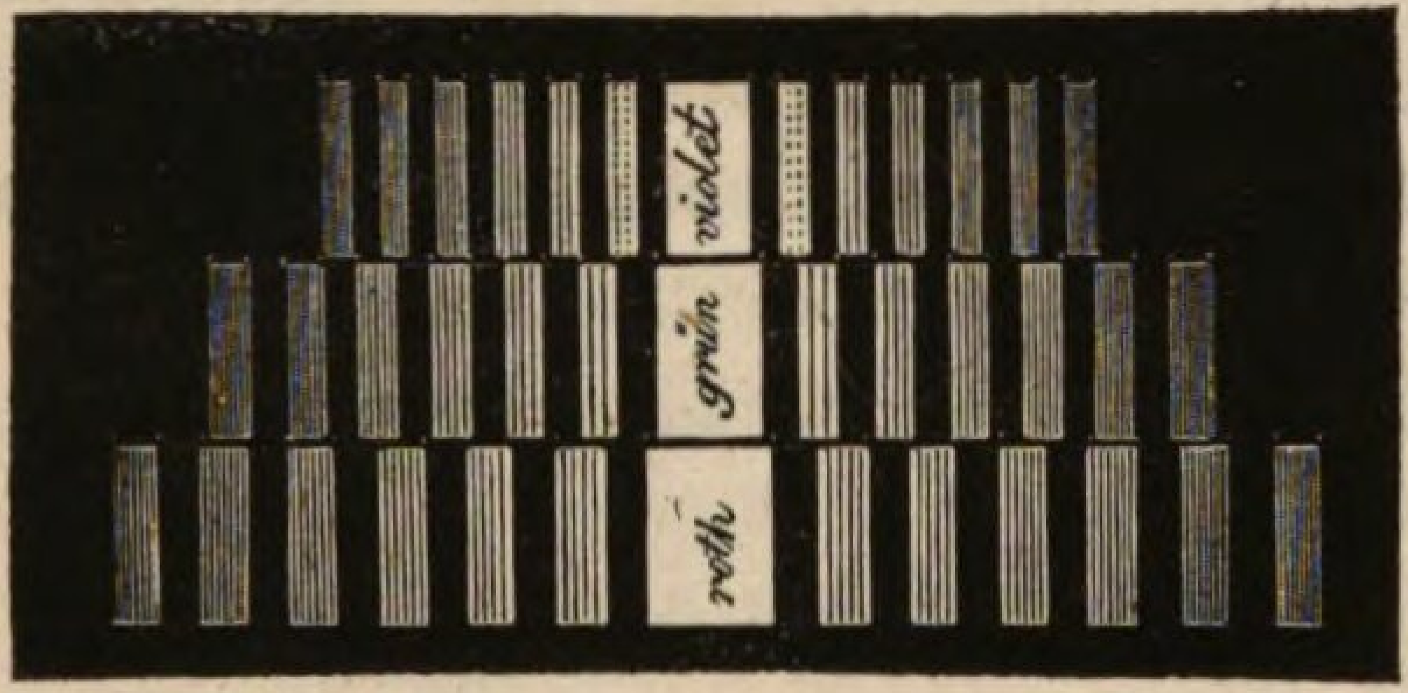
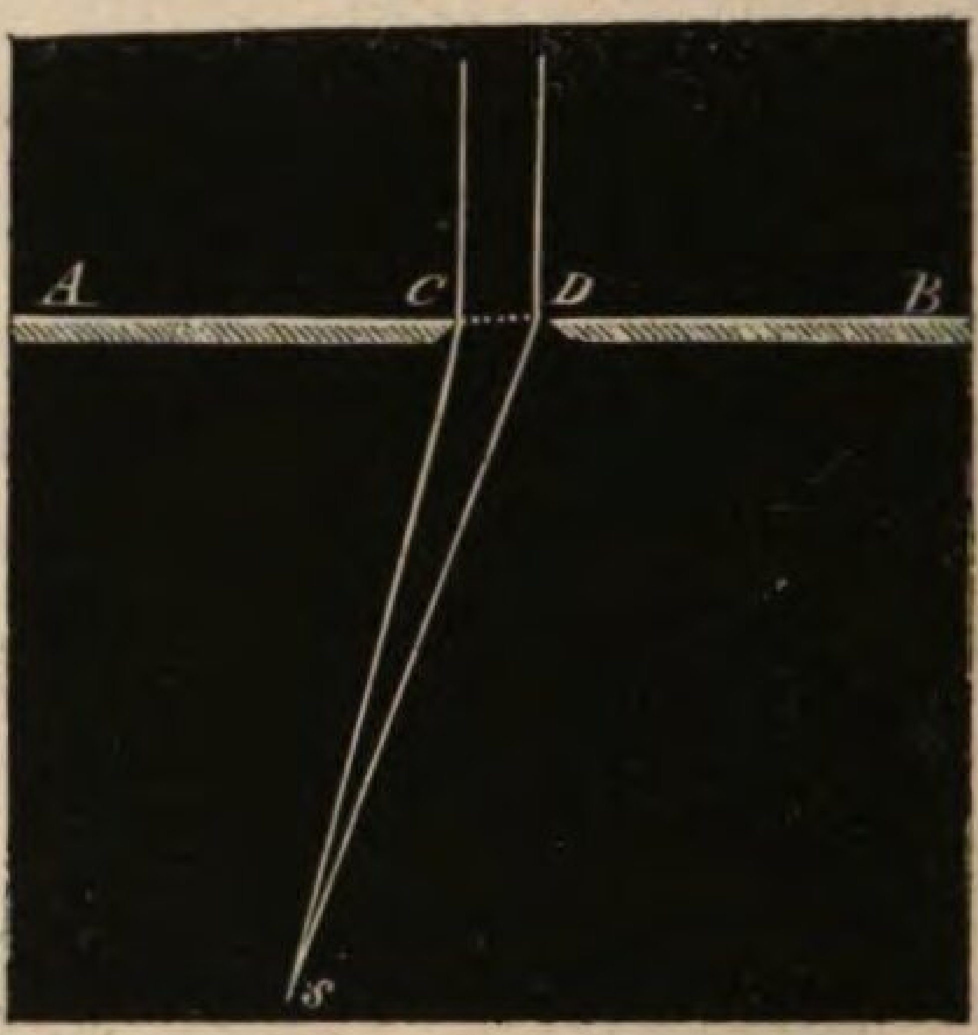


Fig. 337.



als gleichweit von der Lichtquelle entfernt betrachten, alle diese Aethertheilchen befinden sich also in gleichen Schwingungszuständen. Jedes dieser Aethertheilchen pflanzt aber seine Vibrationen jenseits des Schirms nach allen Seiten hin fort, als ob es ein selbstleuchtendes Theilchen wäre; die Stärke der Erleuchtung in irgend einem hinter dem Schirme gelegenen Punkte *s* hängt also nur davon ab, welche Wirkung durch die Interferenz aller in *s* zusammentreffenden von den verschiedenen Punkten der Oeffnung *DC* ausgehenden Strahlen hervorgebracht wird.

Die Lichtstrahlen, welche sich von *CD* aus rechtwinklig zur Oeffnung fortpflanzen, werden sich stets unterstützen; daher ist die Mitte des Bildes hell. Geht man aber zu Punkten über, die seitwärts liegen, so werden sich nicht mehr alle hier zusammentreffenden Strahlen gegenseitig unterstützen; nach der Seite hin muß also die Lichtstärke abnehmen, bis zu einem Punkte, in welchem alle von *CD* aus zusammentreffenden Lichtstrahlen sich vollständig aufheben; hier beobachtet man einen dunklen Streifen.

Noch weiter von der Mitte kommen wieder Punkte, in denen keine vollständige Aufhebung der hier von *CD* aus zusammentreffenden Lichtwellen statt-

findet, in welchen also wieder Licht beobachtet wird; darauf folgen wieder dunklere Streifen, in denen sich alle Lichtwellen gegenseitig aufheben u. s. w.

Daß die hellen und dunklen Streifen für verschiedenfarbige Strahlen nicht zusammenfallen, rührt daher, daß sie ungleiche Wellenlängen haben.

Wenn alle verschiedenfarbigen Strahlen zusammenwirken, wenn man also durch die feine Oeffnung das weiße Sonnenbildchen ohne Anwendung eines farbigen Glases betrachtet, so wird man in der Mitte einen weißen Streif sehen, weil hier das Maximum der Lichtstärke für alle Farben zusammentrifft; die Seitenbilder sind alle gefärbt, nirgends ist mehr ein ganz weißer oder ganz schwarzer Streifen zu sehen, denn da, wo für eine Farbe ein schwarzer Streifen ist, ist für eine andere Farbe ein heller Streifen.

Die Erklärung der Beugungserscheinungen ist hier freilich nur angedeutet, eine weitere Ausführung würde uns aber zu weit führen.

Die Form der Beugungserscheinungen hängt von der From der Oeffnungen ab; auch ändert sie sich mit der Zahl der Oeffnungen.

Wenn zwei feine kreisförmige Oeffnungen im Schirme ganz nahe beisammenstehen, ungefähr so • •, so erblickt man, nach einem Lichtpunkte hinsehend, wieder dieselben Ringe, Fig. 335, als ob nur eine Oeffnung da wäre; diese Ringe erscheinen aber durch gerade schwarze Streifen durchschnitten, welche auf der Richtung der Verbindungslinie beider Oeffnungen rechtwinklig stehen. Diese schwarzen Streifen gehen auch durch den centralen hellen Fleck, Fig. 335, hindurch.

Dieser Versuch beweist klar, daß durch das Zusammenwirken zweier Lichtstrahlen Dunkelheit entstehen kann, oder mit anderen Worten, daß die Wirkung eines Lichtstrahls durch die eines anderen aufgehoben werden kann. Wenn das Licht nur durch ein Loch einfällt, so erblickt man die Fig. 335, sobald aber die zweite Oeffnung hinzukommt, erscheinen schwarze Streifen in den hellen Theilen dieses Bildes, hier wird also die Lichtwirkung der durch die eine Oeffnung einfallenden Strahlen durch diejenigen Strahlen aufgehoben, welche durch die andere Oeffnung fallen.

Sehr schön sind die Beugungserscheinungen, welche man durch eine Reihe feiner Oeffnungen, etwa durch eine Reihe paralleler feiner Linien, welche auf eine Glasplatte radirt sind, erblickt. In diese Klasse der Erscheinungen gehört auch diejenige, welche man wahrnimmt, wenn man durch den Bart der Feder eines kleineren Vogels nach einem Lichtpunkte sieht, ja diese Erscheinung ist schon sehr brillant, wenn man statt des Lichtpunktes nur ein Kerzenlicht anwendet.

Wenn man auf eine Glasplatte sogenanntes Hexenmehl (semen lycopodii) streut und dadurch nach einer Kerze sieht, so erblickt man eine schöne, aus mehreren farbigen Ringen zusammengesetzte Glorie. Auch dies ist eine Beugungserscheinung.

Länge der Lichtwellen. Es ist bereits oben erwähnt worden, daß die Länge der Lichtwellen für verschiedene Farben nicht gleich ist. Die genaue Mes-
sung der Beugungserscheinungen macht es nun möglich, die Länge der Licht- 149
wellen trotz ihrer Kleinheit mit großer Genauigkeit zu ermitteln.

Folgendes ist die Länge der Lichtwellen für die verschiedenen farbigen Strahlen:

Mittleres Roth	0,0000248	Zoll
Orange	0,0000217	»
Gelb	0,0000201	»
Grün	0,0000184	»
Blau	0,0000168	»
Indigo	0,0000156	»
Violet	0,0000145	»

Kennt man die Wellenlänge, so kann man auch die Schwingungsdauer der Lichtwellen berechnen, da man ja weiß, wie viel Zeit das Licht braucht, um von der Sonne zur Erde zu gelangen, und bei jeder Schwingung der Lichtstrahl um eine Wellenlänge fortschreitet. Es ergeben sich:

für rothes Licht	477 000 000 000 000
für violettes Licht	699 000 000 000 000

Schwingungen in der Secunde.

150 **Farben dünner Blättchen.** Jeder durchsichtige Körper erscheint lebhaft gefärbt, wenn er nur hinlänglich dünne Schichten bildet, wie man dies am leichtesten an den Seifenblasen sehen kann. Die Flitterchen einer vor der Glasbläserlampe bis zum Zerplatzen aufgeblasenen Glaskugel schillern in den glänzendsten Farben; ähnliche Farben beobachtet man, wenn ein Tropfen Oel (am besten ein ätherisches Oel, z. B. Terpentinöl) sich auf einer Wasserfläche ausbreitet; wenn ein glänzendes Metallstück, im Feuer erhitzt, sich allmälig mit einer Oxydschicht überzieht (Anlaufen des Stahls). Auch dünne Schichten von Luft bringen solche Farben hervor, wie man oft an Sprüngen in etwas dicken Glasmassen sieht.

In der größten Regelmäßigkeit zeigen sich diese Farben in Form von Ringen, wenn man eine Glaslinse von großer Brennweite auf eine ebene Glastafel, oder umgekehrt die ebene Glastafel auf die Linse legt. **Newton**, welcher diese Farbenringe, die auch nach ihm gewöhnlich die **Newton'schen Ringe** genannt werden, beobachtete, wandte Linsen an, deren Krümmungshalbmesser 15 bis 20 Meter betrug. Da, wo die Glastafel die Linse berührt, sieht man im reflectirten Lichte einen schwarzen Flecken, der mit farbigen concentrischen Ringen umgeben ist, die nach außen hin immer schmäler und matter werden, ungefähr wie Fig. 338 zeigt.

Fig. 338.



Betrachtet man die Ringe durch ein einfarbiges Glas, so sieht man nur abwechselnd helle und dunkle Ringe. Für rothes Licht sind diese Ringe weiter, als für grünes, für grünes weiter, als für violettes. Wenn man statt des

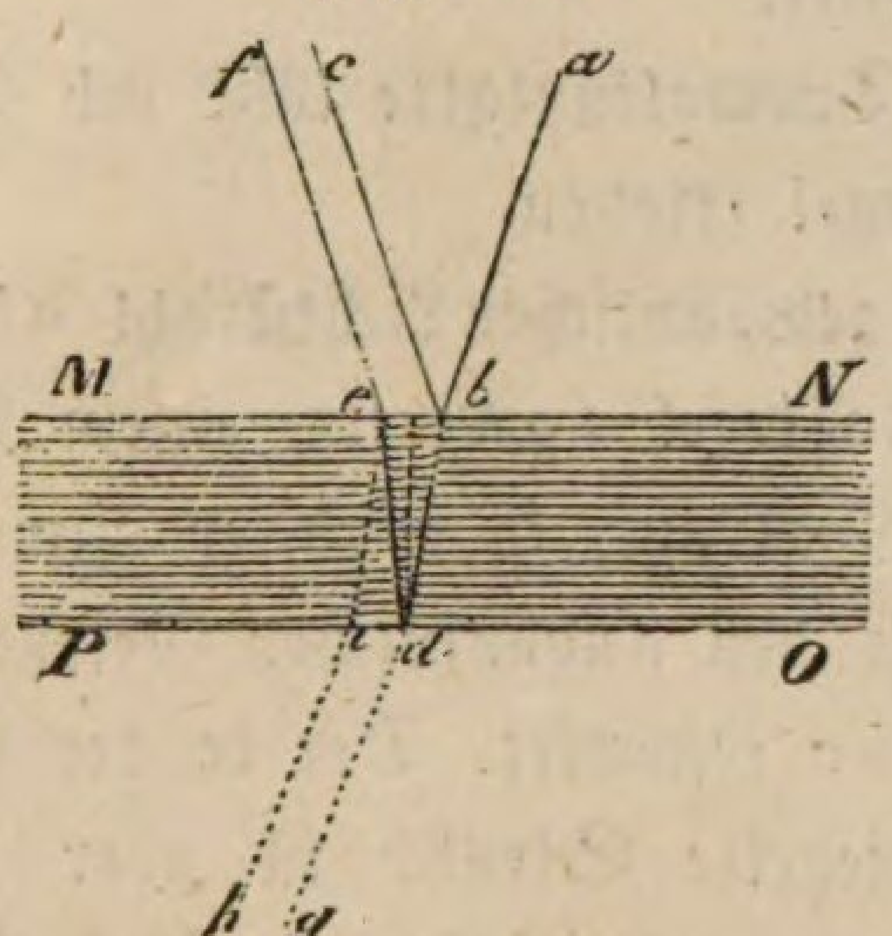
farbigen Lichts weißes anwendet, so kann man nirgends mehr einen ganz schwarzen und nirgends mehr einen ganz weißen Ring sehen, weil weder die hellen noch die dunklen Ringe der verschiedenen Farben mehr zusammenfallen; überall sieht man Farben, die nicht mehr reine Farben des Spectrums, sondern Mischfarben sind.

Diese Farbenerscheinungen lassen sich folgendermaßen erklären:

Wenn Lichtstrahlen auf eine dünne Schicht eines durchsichtigen Körpers fallen, so werden sie theilweise an der oberen, theilweise an der unteren Fläche derselben reflectirt, und die von beiden Flächen reflectirten Lichtstrahlen werden interferiren und sich je nach der Differenz der durchlaufenen Wege bald gegenseitig vernichten, bald verstärken.

Betrachten wir diesen Hergang der Sache etwas näher. In Fig. 339 stelle *MNOP* eine dünne Schicht irgend eines durchsichtigen Körpers vor, welche durch ein Bündel paralleler Strahlen *ab* getroffen wird; dieses Strahlenbündel wird nun theilweise in der Richtung *bc* reflectirt, theilweise aber nach *d* gebrochen. Die gebrochenen Strahlen erleiden aber an der Fläche *OP* eine zweite Theilung, der reflectirte Antheil tritt bei *e* in derselben Richtung aus, wie das schon an der ersten Fläche *MN* reflectirte Strahlenbündel, mithin werden die beiden Strahlenbündel *bc* und *ef* interferiren müssen. Ist die Dicke der Platte $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{4}$ u. s. w. Wellenlängen, so heben sich die Strahlen *bc* und *ef* gegenseitig auf, weil der Gangunterschied $bd + de$ ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge ist; die beiden Strahlen verstärken sich aber da, wo die Dicke der Platte ein Vielfaches einer halben Wellenlänge beträgt.

Fig. 339.



Wie kommt es aber, daß nur dünne Schichten solche Farben zeigen, daß Plättchen von einiger Dicke sie schon nicht mehr zeigen? Nehmen wir, der leichteren Uebersicht wegen, an, die Lichtwellen der violetten Strahlen seyen halb so groß wie die der rothen (sie sind in der That etwas größer als halb so groß), so werden auch die Durchmesser der violetten Ringe halb so groß seyn als die der rothen; an derselben Stelle, wo der erste dunkle Ring für rothes Licht ist, liegt auch der zweite dunkle Ring für violettes Licht und ein heller Ring für eine ungefähr zwischen Roth und Violet in der Mitte liegende Farbe; diese Farbe ist an dieser Stelle entschieden vorherrschend.

An der Stelle, wo der siebente dunkle Ring für rothes Licht liegt, wird der vierzehnte dunkle Ring für violettes Licht liegen; an derselben Stelle befinden sich also noch sechs dunkle Ringe und sieben helle Ringe für zwischenliegende Farben. Wenn also das äußerste Roth die Gränze zwischen Roth und Orange, zwischen Orange und Gelb, Gelb und Grün, Grün und Blau, Blau und Indigo, Indigo und Violet und das äußerste Violet im Minimum sind, so sind

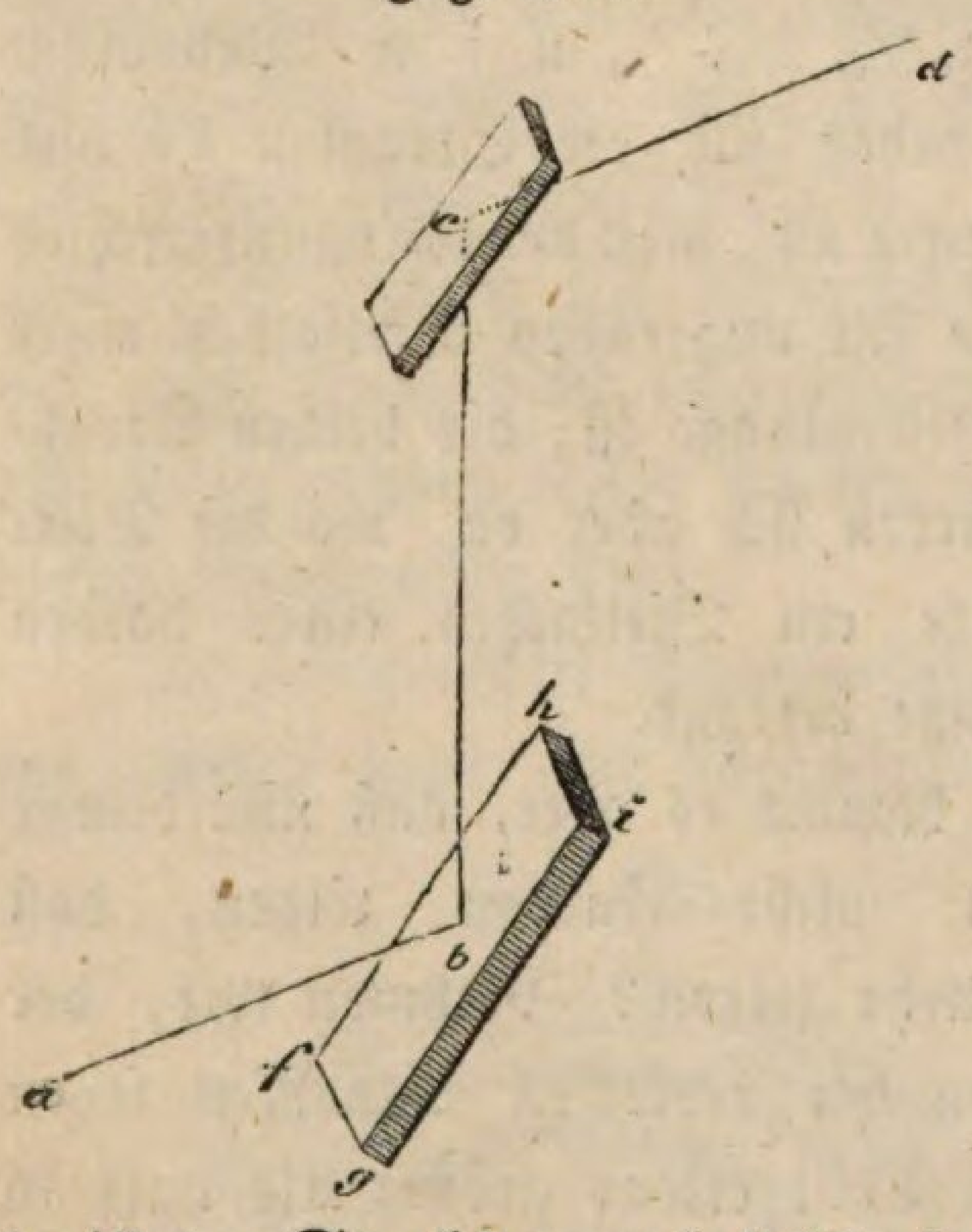
dagegen die mittleren rothen, orangen, gelben, grünen, blauen, indigofarbenen und violetten Strahlen im Maximum, keine dieser Farben kann entschieden vorherrschen, sie geben zusammen weiß.

Auch im durchgelassenen Lichte zeigen dünne Plättchen ähnliche, jedoch weit mattere Farben, welche zu denen im reflectirten Lichte complementär sind.

151 **Polarisation des Lichts.** Wenn man aus einem durchsichtigen Turmalinkrystall eine Platte schneidet, deren Oberfläche mit der Säulenaxe parallel läuft, und durch eine solche Turmalinplatte nach einer polirten Tischplatte hinsieht, welche das Licht des Himmels ungefähr unter einem Winkel von 30—40° nach dem Auge reflectirt, so sieht man die polirte Fläche bald hell, bald dunkel, je nachdem man die Turmalinplatte dreht; sie läßt also nicht in jeder Lage die von der Tischplatte reflectirten Strahlen durch. Den Lichtstrahlen muß also durch die Reflexion auf der polirten Tafel eine eigenthümliche Modification mitgetheilt worden seyn, welche man mit dem Namen der Polarisation bezeichnet.

Hätte man die unter ähnlichen Umständen von einer Glasplatte reflectirten Strahlen mit der Turmalinplatte untersucht, so hätte man dieselbe Erscheinung beobachtet; also auch durch die Reflexion auf einer Glasfläche werden die Lichtstrahlen polarisirt.

Fig. 340.



Auch die Turmalinplatte läßt sich durch einen Glasspiegel ersetzen.

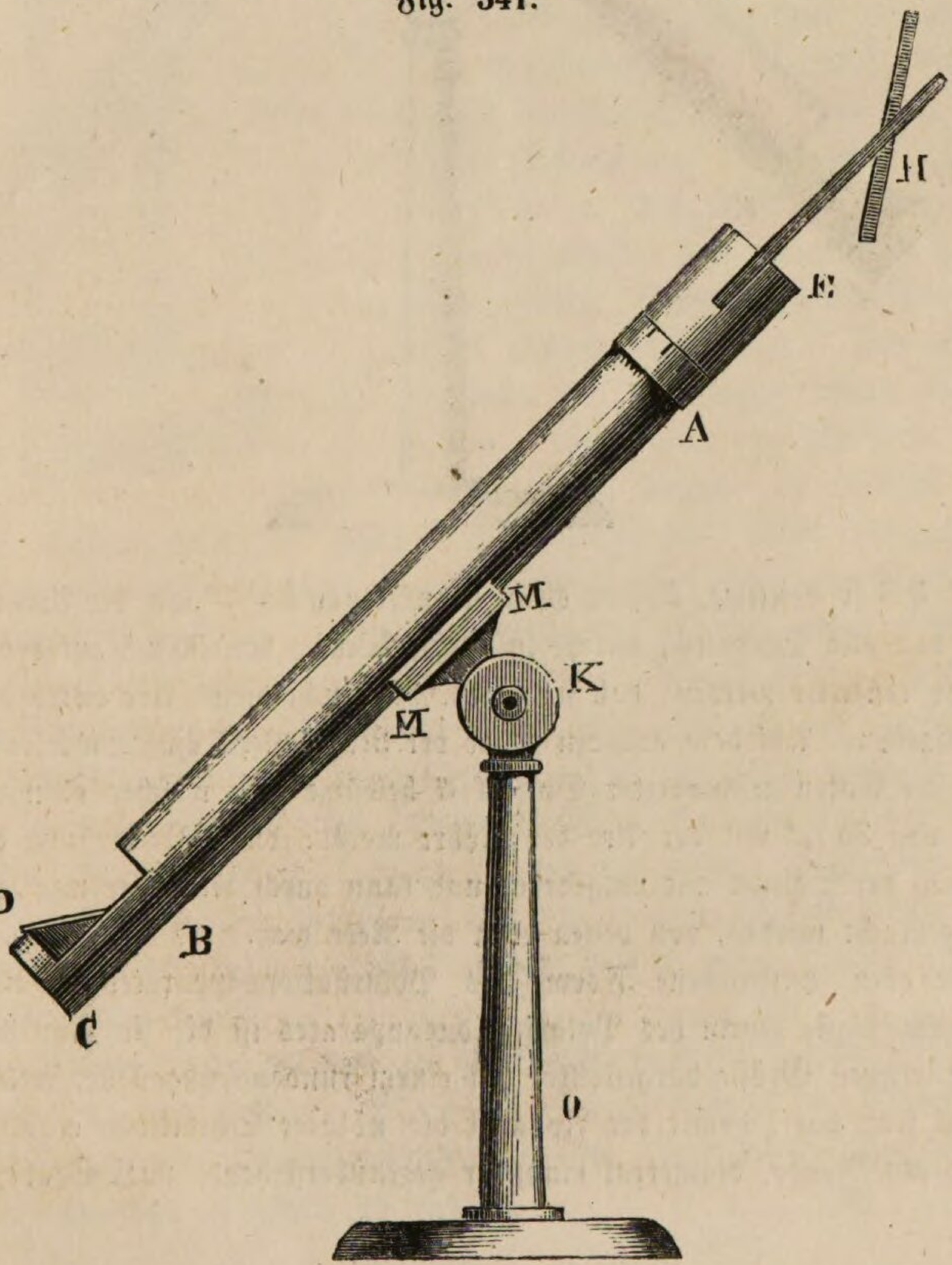
Fällt ein gewöhnlicher Lichtstrahl *ab* auf eine ebene Glastafel *fghi* in einem Winkel von 35½ Grad auf, so wird er zum großen Theil nach den gewöhnlichen Gesetzen in der Richtung *bc* reflectirt. Der in der Richtung *bc* gespiegelte Strahl ist aber durch diese Reflexion polarisirt. Am besten kann man die Erscheinungen beobachten, wenn der Spiegel *fghi* auf der Rückseite geschwärzt ist, denn sonst pflanzen sich in der Richtung *bc* außer den durch Reflexion polarisirten Strahlen auch solche fort, welche von Gegenständen herrühren, die sich unterhalb des Spiegels befinden und welche durch denselben hindurchgegangen sind.

Fällt der durch Reflexion polarisirte Strahl *bc* auf eine zweite ebenfalls auf der Rückseite geschwärzte Glastafel, welche der unteren parallel ist, so macht der Strahl *bc* auch mit dieser einen Winkel von 35½°, und die Reflexionsebene des oberen Spiegels fällt mit der des unteren zusammen. Bei dieser Lage des zweiten Spiegels wird der Strahl *bc* wie jeder gewöhnliche Lichtstrahl reflectirt; dreht man jedoch den oberen Spiegel so, daß die Richtung des Strahls *bc* die Umdrehungsaxe bildet, so bleibt zwar der Winkel, welchen der einfallende Strahl *bc* mit der Spiegelfläche macht, unverändert, allein der Parallelismus der beiden Spiegel hört auf, die Reflexionsebene des oberen Spiegels fällt

nicht mehr mit der des unteren zusammen. Dreht man nun auf die angegebene Weise den oberen Spiegel aus der Lage des Parallelismus mit den unteren heraus, so wird die Intensität des zum zweiten Male reflectirten Strahles um so mehr abnehmen, je mehr der Winkel wächst, den die Reflexionsebene des oberen Spiegels mit der des unteren macht, bis dieser Winkel 90° geworden ist, oder mit anderen Worten, bis die Reflexionsebenen beider Spiegel sich unter einem rechten Winkel kreuzen. Bei dieser Stellung wird der Strahl *bc* von dem oberen Spiegel **gar nicht mehr** reflectirt, was doch der Fall seyn müßte, wenn *bc* ein gewöhnlicher Lichtstrahl wäre. Bei weiter fortgesetzter Drehung des oberen Spiegels nimmt die Intensität des reflectirten Strahles allmälig wieder zu, bis sie wieder ihr Maximum erreicht, wenn die ganze Drehung 180° beträgt. In dieser Stellung fallen die Reflexionsebenen der beiden Spiegel abermals zusammen. Dreht man noch weiter, so wird der zum oberen Spiegel reflectirte Strahl wieder schwächer und verschwindet ganz, wenn die Reflexionsebenen beider Spiegel wieder gekreuzt sind, also bei einer Drehung von 270° ꝛc.

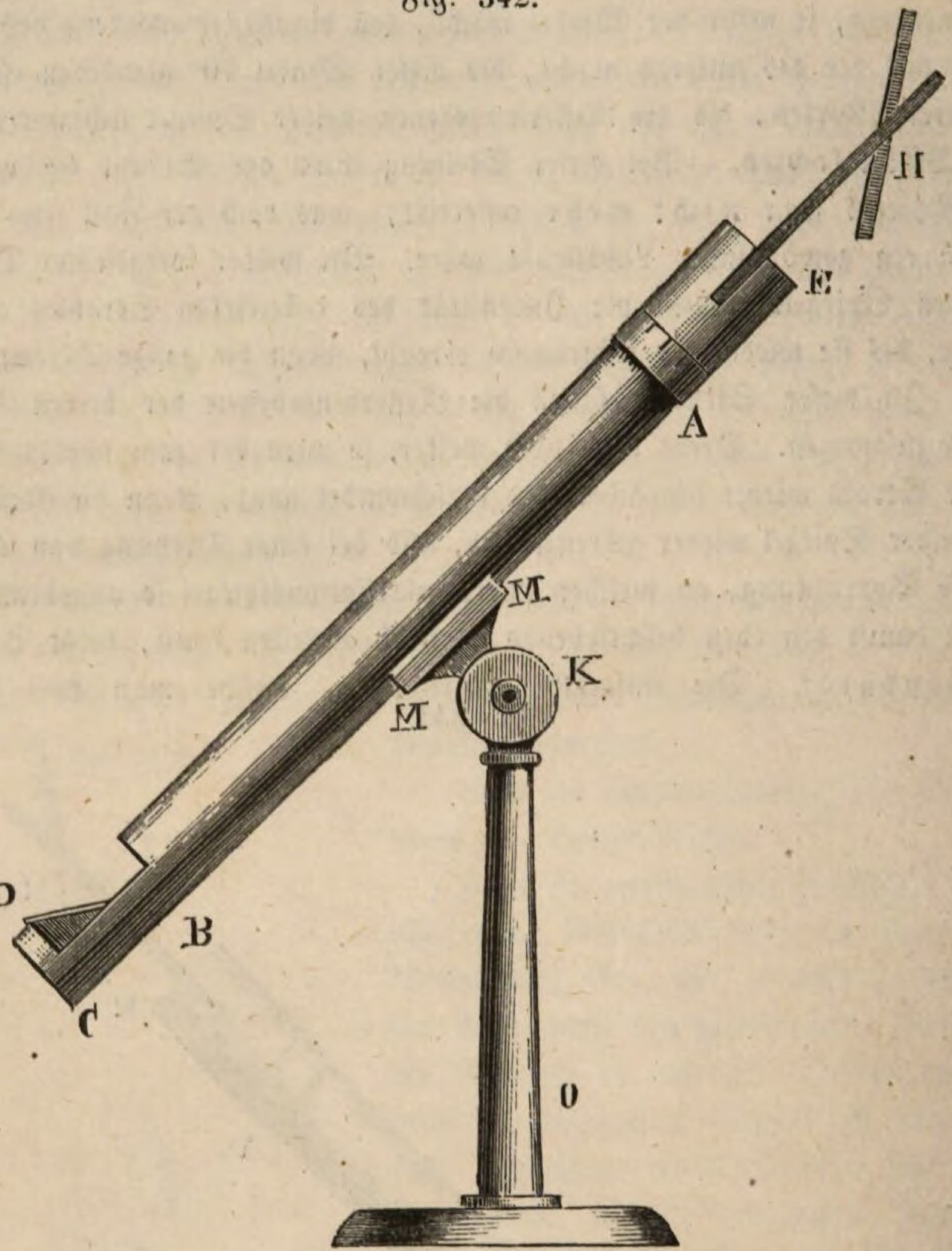
Eine Vorrichtung, an welcher zwei Polarisationsspiegel so angebracht sind, daß man damit den eben beschriebenen Versuch anstellen kann, heißt **Polarisationsapparat**. Die einfachste Einrichtung, welche man dem Polari-

Fig. 341.



sationsapparate geben kann, ist die Fig. 341 abgebildete. An dem einen Ende einer metallenen oder hölzernen Röhre ist ein auf der Rückseite geschwärzter

Fig. 342.

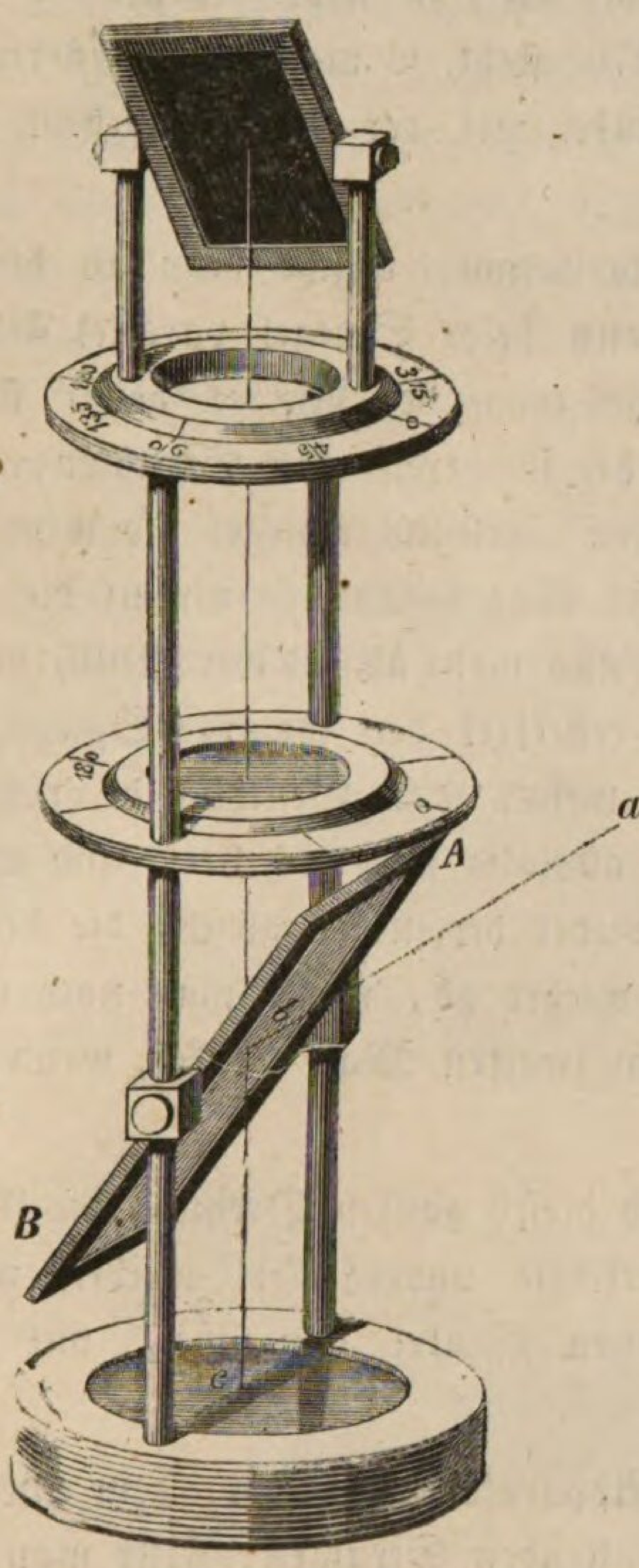


Spiegel *DB* so befestigt, daß er einen Winkel von $35\frac{1}{2}^0$ mit der Axe der Röhre macht, daß also Strahlen, welche in einem Winkel von $35\frac{1}{2}^0$ auf den Spiegel fallen, so reflectirt werden, daß sie in der Richtung dieser Axe durch die Röhre hindurchgehen. Auf dem anderen Ende der Röhre steckt eine Hülse, an welcher ein zweiter hinten geschwärzter Spiegel *H* befestigt ist, welcher ebenfalls einen Winkel von $35\frac{1}{2}^0$ mit der Axe der Röhre macht; durch Umdrehung der Hülse wird auch der Spiegel mit umgedreht und kann durch diese Drehung in alle die Lagen gebracht werden, von denen eben die Rede war.

Die eben beschriebene Form des Polarisationsapparates ist unbequem; die zweckmäßigste Form des Polarisationsapparates ist die in Fig. 343 in ¼ der natürlichen Größe dargestellte. In einem runden Fußgestelle, welches nicht zu leicht seyn darf, damit der Apparat die nöthige Stabilität erhalte, befinden sich am Rande, diametral einander gegenüberstehend, zwei Stäbe, zwischen

denen ein Rähmchen *AB* angebracht ist, welches eine Platte von geschliffenem Spiegelglase einschließt. Dieses Rähmchen und mit ihm der Spiegel ist mittelst zweier Zapfen um eine horizontale Axe drehbar, so daß man dem Spiegel jede beliebige Lage gegen die Richtung des Bleilothes geben kann. Der Spiegel wird jedoch gewöhnlich in einer solchen Lage festgestellt, daß seine Ebene einen Winkel von $35\frac{1}{2}^{0}$ mit der Vertikalen macht. Fällt bei dieser Stellung des Spiegels ein Lichtstrahl *ab* in einem Winkel von $35\frac{1}{2}^{0}$ auf den Spiegel, so geht er zum Theil durch das Glas hindurch, und diesen Theil haben wir weiter nicht zu betrachten; zum Theil aber wird er in der Richtung *bc* vertikal nach unten reflectirt. Dieser reflectirte Strahl ist nun **polarisirt**; eine durch die Linien *ab* und *bc* gelegte Ebene ist seine **Polarisationsebene**.

Fig. 343.



Auf dem Fußgestelle befindet sich in wagerechter Lage ein auf der Rückseite belegter Spiegel, den der polarisirte Strahl *bc* rechtwinklig trifft, so daß er in der Richtung *cb* zurückgeworfen wird, und durch den Polarisationsspiegel hindurch zum oberen Theile des Apparates gelangt. Den mittleren Theil des Apparates bildet ein durch eine Glasplatte verschlossener Ring. Die oberen Enden der Stäbe tragen einen in Grade getheilten Ring. Der Nullpunkt dieser Theilung liegt so, daß, wenn man sich durch die Theilstriche 0 und 180° eine Vertikalebene gelegt denkt, diese Ebene mit der Reflexionsebene des unteren Spiegels, also mit der Polarisationsebene der durch den unteren Spiegel polarisirten Strahlen zusammenfällt. In diesem getheilten Ringe ist ein anderer drehbar, auf welchem diametral gegenüberstehend zwei Säulchen angebracht sind, zwischen denen ein Spiegel von schwarzem Glase oder ein auf der Rückseite geschwärzter Spiegel eben so befestigt ist wie der untere Polarisationsspiegel zwischen den Stäben; wie der untere um eine horizontale Axe drehbar, kann der schwarze Spiegel leicht so gestellt werden, daß er einen Winkel von $35\frac{1}{2}^{0}$ mit der Vertikalen macht.

Der drehbare Ring, auf welchem die Säulchen stehen, ist am Rande etwas zugeschärft, und gerade in der Mitte der vorderen Hälfte des Ringes ist eine Linie, ein Index, auf die Zuschärfung gezogen. Eine durch diesen Index auf

den Mittelpunkt des Ringes gelegte Vertikalebene fällt mit der Reflexionsebene des oberen Spiegels zusammen. Dreht man den Ring, welcher diesen Spiegel trägt, so, daß der Inder mit dem Nullpunkte der Theilung zusammenfällt, so fallen die Reflexionsebenen des oberen und des unteren Spiegels zusammen. Dasselbe ist der Fall, wenn der Inder bei 180° steht. Wenn der Inder bei 90° (wie in unserer Figur) oder bei 270° steht, so macht die Reflexionsebene des oberen Spiegels einen rechten Winkel mit der Reflexionsebene des unteren Polarisationsspiegels.

Die Erscheinungen der gewöhnlichen Polarisation, welche man an diesem Apparate beobachten kann, sind folgende. Wenn beide Spiegel parallel stehen, wenn also der Inder des den schwarzen Spiegel tragenden Ringes bei 0° steht, so reflectirt der obere Spiegel die von unten her ihn treffenden Strahlen, das Gesichtsfeld ist also hell. Dreht man aber den Zerlegungsspiegel (so wird gewöhnlich der obere Spiegel genannt) aus dieser Lage heraus, so nimmt die Intensität des durch ihn reflectirten Lichts mehr und mehr ab und wird Null, wenn der Inder bei 90° steht. In dieser Stellung reflectirt der schwarze Spiegel die von unten her ihn treffenden Strahlen nicht mehr, das Gesichtsfeld erscheint dunkel. Dreht man noch weiter, so wird es allmälig wieder heller, und wenn der Inder bei 180° steht, ist die Lichtstärke wieder derjenigen gleich, die bei 0° beobachtet wurde. Das Licht nimmt jedoch wieder ab, wenn man noch über 180° hinaus dreht, das Gesichtsfeld wird zum zweiten Male dunkel, wenn der Inder bei 270° steht.

Es versteht sich von selbst, daß während dieser ganzen Drehung die Richtung des schwarzen Spiegels gegen die Vertikale unverändert bleiben muß. In allen Lagen macht der obere Spiegel einen Winkel von $35\frac{1}{2}$° mit der Vertikalen.

Giebt man, ohne sonst etwas an dem Apparate zu ändern, dem unteren Spiegel eine andere Stellung gegen die einfallenden Strahlen, stellt man ihn z. B. so, daß er einen Winkel von 25° mit der Vertikalen macht, so werden solche Strahlen zum oberen Spiegel des Apparates gelangen, die den unteren Polarisationsspiegel auch unter einem Winkel von $35\frac{1}{2}$° getroffen haben. Wiederholt man nun die oben beschriebenen Versuche, so findet man, daß das von dem oberen Spiegel zurückgeworfene Licht nie ganz Null wird. Wenn der obere Spiegel so gestellt ist, daß seine Reflexionsebene die des unteren kreuzt, wenn also der Inder der oberen Theilung bei 90° steht, so wird er in dieser Stellung freilich weniger Licht reflectiren als in jeder anderen, doch wird immer noch ein Theil der von unten kommenden Strahlen reflectirt.

Es läßt sich daraus schließen, daß die unter einem Winkel von 25° vom unteren Polarisationsspiegel reflectirten Strahlen zwar zum Theil, aber doch nicht vollständig polarisirt sind. Je mehr der Winkel, welchen die auf den unteren Glasspiegel fallenden Strahlen mit der Ebene dieses Spiegels machen, von $35\frac{1}{2}$° abweicht, desto unvollständiger ist die Polarisation. Der Winkel, für welchen

die vollständige Polarisation stattfindet, für Glas also der Winkel $35\frac{1}{2}^{\circ}$, wird der Polarisationswinkel genannt.

Metallflächen haben die Eigenschaft nicht, durch Reflexion das Licht zu polarisiren, man kann deshalb auch Spiegel, welche auf der Rückseite mit Zinn und Quecksilber belegt sind nicht zu Polarisationsversuchen gebrauchen.

Nach der Vibrationstheorie erklärt man die Polarisation des Lichts durch die Annahme, daß alle Vibrationen eines polarisirten Lichtstrahls in einer und derselben Ebene stattfinden, während die Vibrationen eines gewöhnlichen Lichtstrahls nach allen möglichen auf seine Richtung rechtwinkligen Linien vor sich gehen.

Die Schwingungen eines durch Reflexion polarisirten Strahls sind mit der Ebene des Spiegels parallel, wie dies Fig. 344 anschaulich machen soll. *RS* sey der Spiegel, *ab* der einfallende, *bc* der reflectirte und durch die Reflexion polarisirte Strahl, so ist die durch *ab* und *bc* gelegte Ebene, welche die Ebene des Spiegels in *gh* schneidet, diejenige, welche die Polarisationsebene des Strahls *bc* genannt wird; *dflm* aber ist die Schwingungsebene dieses Strahls, d. h. die Vibrationen, welche den polarisirten Strahl *bc* fortpflanzen, finden in der Ebene *fdlm* Statt, und zwar sind sie mit *fd* parallel.

Fig. 344.

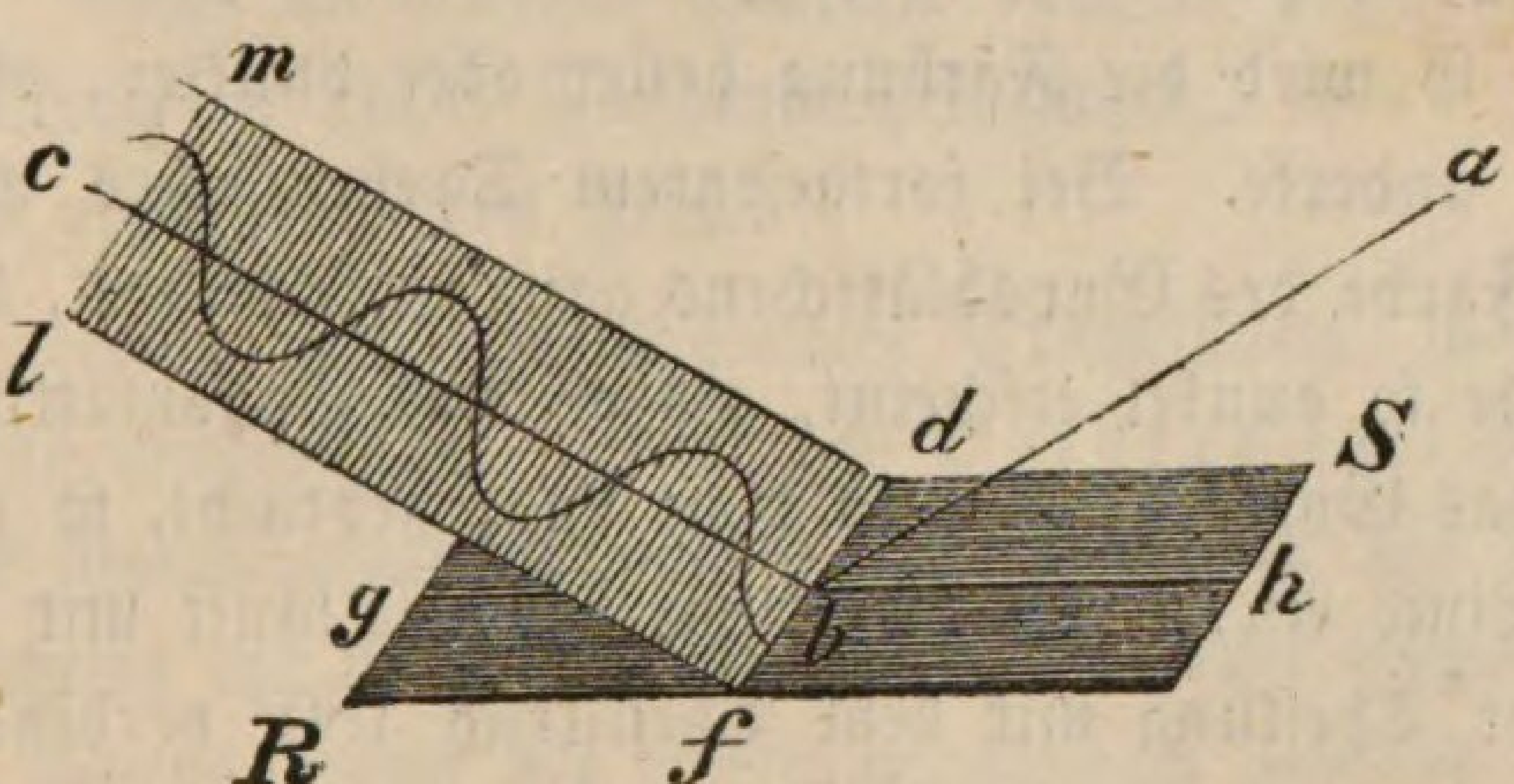
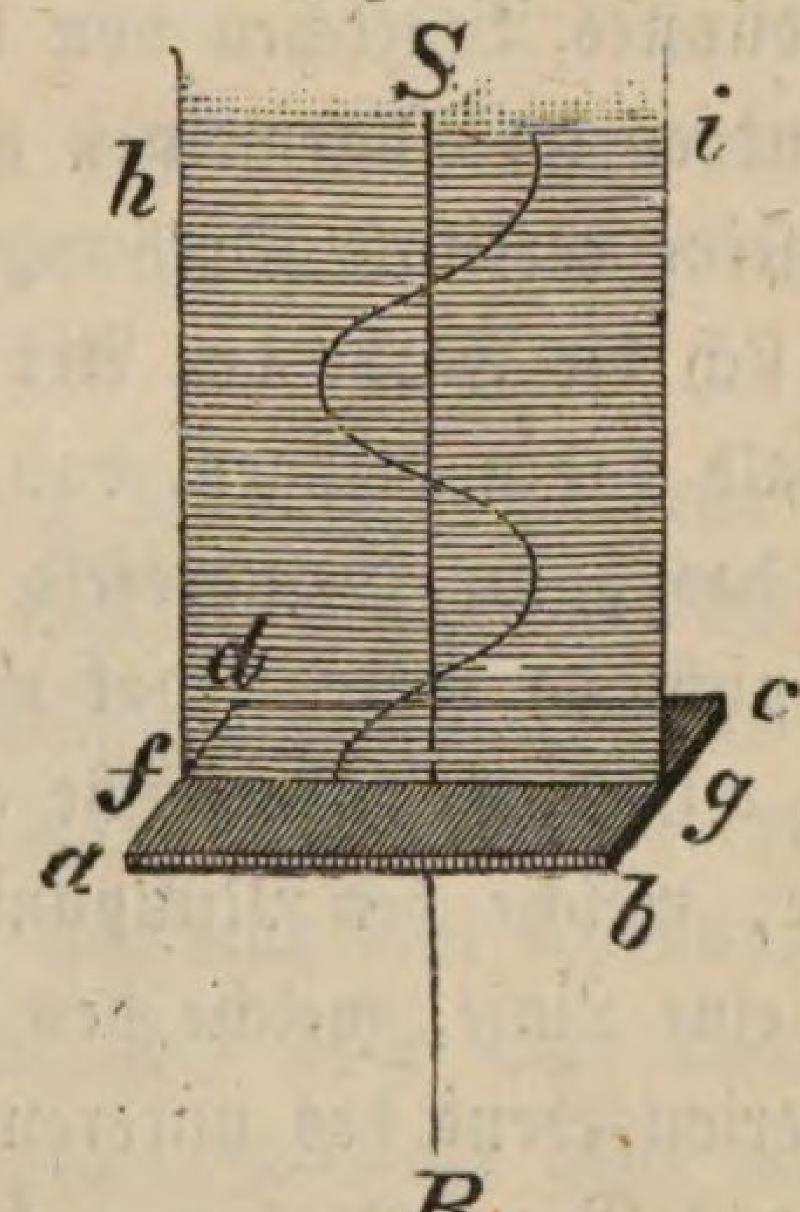


Fig. 345.



Wenn ein Lichtstrahl durch eine parallel mit der Axe geschnittene Turmalinplatte gegangen ist, so finden seine Schwingungen in der durch die Richtung des Strahls und die Axe des Krystalls gelegten Ebene Statt. In Fig. 345 sey *abcd* eine Turmalinplatte; die Richtung ihre Axe parallel mit *ab* und *dc*; ferner sey *RS* die Richtung des Strahls, so wird nach dem Durchgang durch die Platte *fghi* die Schwingungsebene des Strahls seyn.

Doppelte Brechung. Wenn man ein Kalkspathrhomboeder auf ein 152
mit einem schwarzen Punkte oder einer schwarzen Linie versehenes Stück Papier legt, so sieht man den Punkt oder die Linie doppelt.

Wenn man aus Kalkspath ein Prisma verfertigt, so sieht man durch diese Prisma von jedem Gegenstande zwei Bilder.

Diese Versuche beweisen, daß jeder Lichtstrahl, welcher ein Kalkspathprisma

trifft, in zwei gespalten wird, welche nicht denselben Brechungsgesetzen folgen, daß der Kalkspath die Eigenschaft der doppelten Brechung besitzt.

Untersucht man die beiden Bilder, welche man von irgend einem Gegenstande durch ein Kalkspathprisma sieht, mittelst einer Turmalinplatte, so findet man, daß beide Strahlen polarisirt sind, denn je nachdem man die Turmalinplatte dreht, verschwindet bald das eine, bald das andere Bild; die Ebene, in welcher die Schwingungen des einen Strahls stattfinden, ist rechtwinklig zur Schwingungsebene des anderen Strahls.

Der Kalkspath ist nicht der einzige doppelt brechende Körper; dieselbe Eigenschaft kommt allen krystallisirten Substanzen zu, welche nicht zum regulären Krystallsysteme gehören.

In jedem doppelt brechenden Krystalle giebt es eine oder zwei Richtungen, nach welchen keine doppelte Brechung stattfindet; diese Richtungen führen den Namen der optischen Axen.

Eine Entwickelung der Gesetze der doppelten Brechung würde hier zu weit führen; wir wollen nur noch die Farbenerscheinungen kurz betrachten, welche doppelt brechende Krystallblättchen im polarisirten Lichte zeigen.

Nehmen wir an, die Spiegel des Polarisationsapparates seyen gekreuzt, d. h. der obere Spiegel sey so gestellt, wie es Fig. 343 zeigt. Legt man nun ein dünnes Blättchen von krystallisirtem Gyps auf das mittlere Tischlein, so erscheint es im Allgemeinen gefärbt; dreht man das Tischlein in horizontaler Ebene um seine vertikale Drehungsaxe, so wird die Färbung heller oder dunkler, ohne daß sich die Farbe der Art nach änderte. Bei fortgesetztem Drehen wird man es bald dahin bringen, daß die Farbe des Gypsblättchens ganz verschwindet, daß also das ganze Gesichtsfeld gerade so dunkel erscheint, als ob das Gypsblättchen gar nicht da wäre. Hat man das Gypsblättchen in diese Lage gebracht, so ritze man auf seiner Oberfläche eine Linie ein, deren Richtung parallel läuft mit der Linie, welche den Nullpunkt der Theilung mit dem Theilstrich 180° verbindet, also eine Linie, welche den Durchschnitt der Ebene des Gypsblättchens mit der Reflexionsebene des unteren Spiegels bezeichnet. Eine zweite Linie ritze man auf das Gypsblättchen rechtwinklig zur ersteren.

Diese beiden Linien bezeichnen nun die Lage der Schwingungsebenen der beiden Strahlen, in welche ein Lichtstrahl getheilt wird, welcher das Gypsblättchen trifft. Wenn der einfallende Strahl rechtwinklig auf die Ebene des Gypsblättchens auftrifft, so werden die beiden Strahlen zwar nicht der Richtung nach auseinander gehen; allein sie pflanzen sich mit ungleicher Geschwindigkeit durch den Krystall fort, weil die Elasticität des Aethers nach der Richtung der beiden Schwingungsebenen nicht gleich ist.

Dreht man das Gypsblättchen aus der Lage heraus, in welcher es ganz dunkel erscheint, so wird es heller, und heller und seine Farbe erhält den größten Glanz, wenn die beiden Schwingungsebenen des Gypsblättchens einen Winkel von 45° mit der Schwingungsebene des unteren Spiegels machen.

Bleibt das Blättchen nun in dieser Lage, dreht man aber den oberen Spie-

gel, so wird die Farbe des Blättchens blasser und blasser (nicht dunkler), bis es endlich ganz farblos erscheint, wenn die Reflexionsebene des oberen Spiegels 45° mit der des unteren macht, wenn also die Reflexionsebene des oberen Spiegels mit der einen Schwingungsebene des Gypsblättchens zusammenfällt. Dreht man den oberen Spiegel noch weiter, so geht die Farbe des Gypsblättchens in die complementäre von derjenigen über, die man bis dahin beobachtete, und diese complementäre Farbe wird am lebhaftesten, wenn die Reflexionsebene des oberen Spiegels mit der des unteren zusammenfällt.

Die Erklärung dieser Erscheinung kann hier nur angedeutet, aber nicht ausgeführt werden.

Der von dem unteren Polarisationsspiegel kommende Strahl wird bei seinem Eintritt in das Gypsblättchen in zwei gespalten, die zwar der Richtung nach nicht auseinander treten, aber doch den Krystall mit ungleicher Geschwindigkeit durchlaufen, so daß der eine dem anderen voraneilt. Wenn nun diese beiden Strahlen durch den Zerlegungsspiegel auf eine und dieselbe Schwingungsebene reducirt werden, so können sie interferiren. Die Farben entstehen also hier nach ähnlichen Gesetzen, wie die Farben der Newton'schen Ringe, die Farbe des Blättchens hängt also auch natürlich von seiner Dicke ab.

Dünne Blättchen anderer doppelt brechender Körper bringen ähnliche Farbenerscheinungen hervor.

Auch in dickeren Platten doppelt brechender Krystalle beobachtet man im polarisirten Lichte Farbenerscheinungen, wenn ihre Oberflächen rechtwinklig auf den optischen Axen stehen.

Eine ganz eigenthümliche Erscheinung, welche sich bei keinem anderen Krystalle wiederfindet, bietet der Bergkrystall dar. Legt man auf das Tischlein des Polarisationsapparates eine senkrecht zur Axe geschnittene Quarzplatte, so erscheint ihr Bild in dem oberen Spiegel lebhaft gefärbt, und zwar ändert sich die Farbe, wenn der Zerlegungsspiegel gedreht wird, während eine Drehung der Quarzplatte keine Aenderung in der Farbe hervorbringt. Wie man auch den Zerlegungsspiegel drehen mag, so erscheint doch die Platte niemals ganz farblos hell oder ganz dunkel, wie es bei Gypsblättchen beobachtet wird.

Um diese Erscheinung in ihrer möglichsten Einfachheit kennen zu lernen, muß man einfarbiges Licht anwenden, was am einfachsten dadurch bewerkstelligt wird, daß man durch ein rothes Glas sieht.

Erscheint nun die Quarzplatte zwischen den gekreuzten Spiegeln des Polarisationsapparates, durch das rothe Glas gesehen, hell, so wird man es durch Drehen des Zerlegungsspiegels nach der rechten oder nach der linken Seite bald dahin bringen, daß das Gesichtsfeld ganz so dunkel ist, wie es zwischen gekreuzten Spiegeln ohne die Quarzplatte seyn würde, kurz, die Polarisationsebene der von unten kommenden Strahlen erscheint durch die Quarzplatte nach der rechten oder linken Seite gedreht.

Die Größe der Drehung hängt von der Dicke der Platte ab und ist dieser

proportional. Eine Quarzplatte von 1 Millimeter Dicke dreht die Polarisationsebene der rothen Strahlen um 19°.

Für die brechbareren Strahlen ist die Drehung der Polarisationsebene durch dieselbe Quarzplatte größer und zwar: für Gelb 23°, für Grün 28°, für Blau 32°, für Violet 41°. Aus der ungleichen Drehung, welche die Polarisationsebene verschiedener Strahlen in derselben Quarzplatte erleidet, erklärt sich auch, weshalb sie bei Anwendung von weißem Licht für keine Stellung des Zerlegungsspiegels ganz farblos hell oder ganz dunkel erscheint.

Je nachdem eine Quarzplatte die Polarisationsebene nach der rechten oder nach der linken Seite dreht, nennt man sie rechts oder links drehend.

Diese eigenthümliche Erscheinung, welche senkrecht auf die Axe geschliffene Quarzplatten zeigen, wird mit dem Namen der Circularpolarisation bezeichnet.

Außer dem Quarz findet sich die Circularpolarisation bei keinem anderen festen Körper mehr, wohl aber bei mehreren flüssigen.

Um die Circularpolarisation in Flüssigkeiten zu beobachten, gießt man sie in eine oben offene, am Boden durch eine ebene Glasplatte geschlossene Röhre von 6 bis 10 Zoll Höhe und stellt diese auf das Tischlein des Apparates.

Rechts drehende Flüssigkeiten sind unter anderen Citronenöl, Zuckersyrup, Auflösung von Kampher in Weingeist u. s. w. Links drehende sind dagegen Terpentinöl, Kirschlorbeerwasser u. s. w.

Die Drehung der Polarisationsebene durch Flüssigkeiten ist ungleich geringer als beim Bergkrystall; um dieselbe Größe der Drehung hervorzubringen wie eine Quarzplatte, muß eine Säule von Citronenöl 34-, eine Säule von Terpentinöl 68mal so hoch seyn wie die Quarzplatte; man muß deshalb schon ziemlich lange Säulen der Flüssigkeiten anwenden, wenn die Erscheinungen der Circularpolarisation recht deutlich hervortreten sollen.

Man hat besondere Apparate zur Untersuchung der Circularpolarisation in Flüssigkeiten construirt, bei welchen die Röhre horizontal liegt; natürlich ist sie in diesem Falle an beiden Enden durch ebene Glasplatten geschlossen. Die Polarisationsspiegel sind durch sogenannte Nicol'sche Prismen ersetzt; es sind dies Kalkspathprismen, welche durch eine besondere Construction die Eigenschaft haben, nur Licht hindurchzulassen, welches in einer bestimmten Schwingungsebene vibrirt, welche also gerade so wirken wie der Polarisations- und der Zerlegungsspiegel.

Man hat von der Circularpolarisation praktische Anwendung zu machen gesucht; eine Säule von Zuckersyrup von bestimmter Länge wird nämlich die Polarisationsebene um so stärker drehen, je concentrirter sie ist; die Drehung der Polarisationsebene ist also ein Mittel, den Concentrationsgrad einer Zuckerlösung zu erkennen.

Sechstes Kapitel.

Chemische Wirkungen des Lichts.

Einfluß des Lichts auf chemische Verbindungen und Zersetzungen. 153
Bei gewöhnlicher Temperatur verbinden sich im Dunklen Chlorgas und Wasserstoffgas nicht mit einander; sobald man aber dem Lichte den Zutritt gestattet, geht die Verbindung vor sich, und zwar langsam im Tageslicht, unter Explosion im Sonnenlicht. — Das in Wasser absorbirte Chlorgas entzieht nur unter Einwirkung des Lichts dem Wasser allmälig den Wasserstoff; Phosphor, welcher in Wasser aufbewahrt wird, verwandelt sich im Sonnenlichte in rothes Phosphoroxyd. — Concentrirte Salpetersäure zersetzt sich am Licht schon bei gewöhnlicher Temperatur zum Theil in Sauerstoff und Untersalpetersäure; das weiße Chlorsilber wird durch das Licht erst violet gefärbt und endlich ganz schwarz, indem ein Theil seines Chlors entweicht u. s. w. Es sind hier nur einige der auffallendsten Beispiele angeführt, um den Einfluß des Lichts auf chemische Verbindungen und Zersetzungen nachzuweisen; es finden sich solcher Beispiele noch viele in allen Lehrbüchern der Chemie.

Sehr auffallend ist der Einfluß des Lichts auf die Zersetzung organischer Substanzen; es befördert nämlich die Vereinigung des Sauerstoffs der Atmosphäre mit dem Kohlenstoffe und dem Wasserstoffe der organischen Stoffe; daher kommt denn auch das Bleichen vegetabilischer Farbstoffe im Lichte, namentlich im Sonnenlichte; die gelbe Färbung des Terpentinöls, die grüne Färbung des gelben Guajaks, wenn eine weingeistige Lösung desselben, auf Papier gestrichen, dem Lichte ausgesetzt wird u. s. w.

Zum Gedeihen der lebenden Pflanzen ist das Licht durchaus nöthig, im Dunklen ist eine kräftige Entwickelung unmöglich; sie erhalten bald ein verkümmertes Ansehen, Blätter und Blüthen bleiben blaß. Pflanzen, die in Zimmern gezogen werden, wachsen bekanntlich immer nach den Fenstern hin.

Die grünen Theile der Pflanzen absorbiren Kohlensäure aus der Luft; diese Kohlensäure wird zerlegt, der Kohlenstoff bleibt als Bestandtheil der Pflanze zurück, während der Sauerstoff wieder in die Atmosphäre ausgehaucht wird. Diese Zersetzung der Kohlensäure und das Aushauchen von Sauerstoff in die Luft findet aber nur unter dem Einflusse des Lichts Statt. Man kann sich leicht davon überzeugen, wenn man einen frischen grünen Zweig unter eine mit kohlensäurehaltigem Wasser gefüllte Glasglocke bringt; im Lichte entwickeln sich zahlreiche Gasblasen an den Blättern, die in den oberen Theil der Glasglocke aufsteigen; das hier gesammelte Gas ist Sauerstoffgas. Diese Gasentwickelung findet im Dunklen nicht Statt, sie hört auf, sobald dem Wasser alle freie Kohlensäure entzogen worden ist.

Im Allgemeinen ist die chemische Wirkung der blauen und violetten Strahlen ungleich stärker als die der rothen.

154 **Photographie.** Schon Wedgwood kam auf den Gedanken, die Schwärzung des Chlorsilbers zu benutzen, um die Bilder der camera obscura zu fixiren, und in der That stellte Davy mittelst eines Sonnenmikroskops die Bilder kleiner Gegenstände auf Chlorsilberpapier dar; sie wurden aber bald durch die fortdauernde Einwirkung des Lichts auf das Chlorsilber wieder vernichtet. Niepce brachte es in der Kunst, solche Lichtbilder zu fixiren, schon weiter; allein erst Daguerre fand nach vielen mühsamen Versuchen ein Verfahren, welches in dieser Hinsicht fast Unglaubliches leistet.

Das Material, auf welchem die Daguerre'schen Lichtbilder dargestellt werden, ist eine plattirte, d. h. eine mit einer dünnen Silberschicht überzogene Kupferplatte. Nachdem sie gehörig gereinigt worden ist, wird sie auf eine viereckige Porcellanschale gelegt, welche eine wässerige Lösung von Chlorjod enthält, und hier so lange den Dämpfen des Jods ausgesetzt, bis sich eine goldgelbe oder violette Schicht von Jodsilber auf der Platte gebildet hat. Nun wird die Platte, vor jeder fremden Einwirkung des Lichts geschützt, genau an der Stelle in die camera obscura eingesetzt, an welcher ein scharfes Bild des abzubildenden Gegenstandes entsteht. Nach einiger Zeit, deren Dauer von mannichfachen Umständen abhängt, wird die Platte aus der camera obscura weggenommen. Man sieht jetzt noch keine Spur eines Bildes; dasselbe tritt aber alsbald hervor, wenn man sie über eine mit Quecksilber überzogene etwas erwärmte Platte bringt. Sobald das Bild hinlänglich ausgeprägt ist, wird die Platte in eine Lösung von unterschwefligsaurem Natron gelegt, wodurch der Ueberzug von Jodsilber aufgelöst und so eine fernere Einwirkung des Lichts unmöglich gemacht wird.

An den Stellen der jodirten Platte, auf welche die hellen Partien des Bildes der camera obscura gefallen waren, hat das Licht schon eine Einwirkung hervorgebracht, bevor dieselbe dem Auge sichtbar wird; diejenigen Stellen der Platte nämlich, welche dem Lichte am meisten ausgesetzt waren, haben die Eigenschaft erhalten, Quecksilberdämpfe zu condensiren, hier schlägt sich also Quecksilber in unendlich feinen Perlchen nieder, während da, wo das Licht nicht eingewirkt hat, kein solcher Niederschlag stattfindet. Nachdem nun an den letzteren Stellen das völlig unveränderte Silberjodid abgewaschen worden ist, hat man an den hellen Partien des Bildes den feinen Quecksilberstaub, da, wo das Licht nicht eingewirkt hat, den glänzenden Silberspiegel; und wenn man die Platte so hält, daß der Spiegel solche Strahlen in das Auge reflectirt, welche von dunklen Gegenständen kommen, so bildet dieser Silberspiegel den dunklen Grund, auf welchem die hellen Partien durch das von den Quecksilberkügelchen nach allen Seiten hin zerstreute Licht hervortreten.

Wenn man die Platte länger in der camera obscura läßt, so wird die Wirkung des Lichts auf der jodirten Platte ohne Weiteres sichtbar, indem das Jodsilber da geschwärzt wird, wo das Licht am kräftigsten wirkt; das auf diese

Weise entstehende Bild ist ein negatives, d. h. den hellen Stellen des Gegenstandes entsprechen die dunklen Stellen des Bildes und umgekehrt.

Wenn man die Platte so lange in der camera obscura gelassen hat, daß die Lichtwirkung auf derselben sichtbar wird, so ist der zur Erzeugung eines Daguerre'schen Bildes geeignete Moment schon vorüber.

Ein Daguerre'sches Bild kann nie ganz die richtigen Verhältnisse zwischen Licht und Schatten wiedergeben, weil die verschiedenen Farben so höchst ungleich auf die jodirte Platte wirken; grüne Strahlen bringen fast gar keine Wirkung hervor, weshalb denn auch in Daguerre'schen Bildern die Bäume immer sehr dunkel erscheinen; auch die rothen Strahlen wirken sehr wenig. Durch diesen Umstand verlieren die Daguerre'schen Portraits oft sehr an Aehnlichkeit.

Talbot befolgt eine ganz andere Methode zur Darstellung seiner photographischen Bilder. Er bedient sich eines gegen das Licht empfindlichen Papiers, dessen Bereitungsweise wir hier nicht näher beschreiben können und welches er kalotypes Papier nennt. Auf diesem Papiere wird in der camera obscura ein negatives Bild erzeugt und dasselbe durch Bromkalium fixirt.

Dieses negative Bild wird mit einem eben so präparirten Papiere zwischen zwei Glasplatten gelegt und dem Sonnenlichte ausgesetzt; die dunklen Stellen des Bildes halten das Licht von dem zweiten Papiere ab, während es durch die hellen Stellen hindurch wirkt, und so entsteht denn auf diesem zweiten Papiere ein positives Bild. Mit einem und demselben negativen Originale kann man mehrere positive Copien machen.

Sechster Abschnitt.

Magnetismus und Elektricität.

Erste Abtheilung.

Magnetismus.

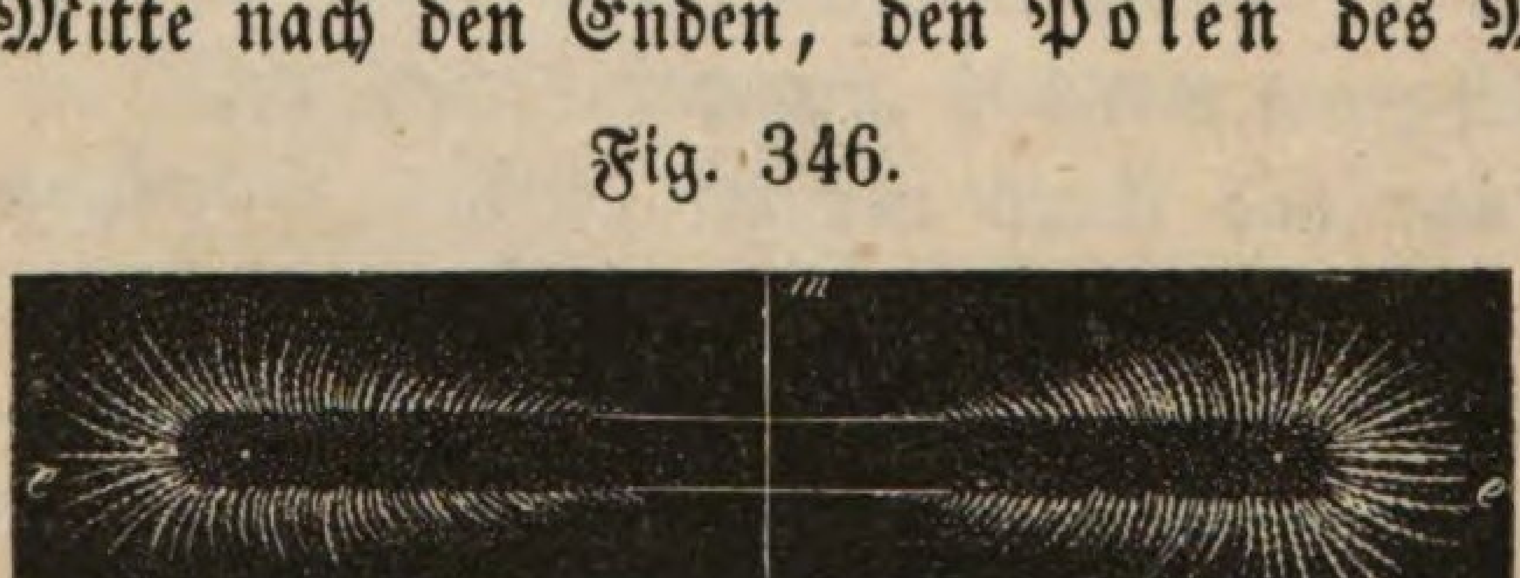
Erstes Kapitel.

Gegenseitige Wirkung der Magnete auf einander und auf magnetische Körper.

155 **Magnetische Pole.** Man findet im Schooße der Erde gewisse Eisenerze, die man Magneteisensteine nennt und welche öfters die Eigenschaft haben, Eisen anzuziehen, in welchem Fall sie den Namen der natürlichen Magnete führen. Das Magneteisen ist eine Verbindung von Eisenoxyd mit Eisenoxydul; Magneteisensteine welche die Eigenschaft haben, Eisen anzuziehen, nennt man natürliche Magnete. Dem Eisen läßt sich dieselbe Eigenschaft vorübergehend, dem Stahle läßt sie sich bleibend mittheilen; solche aus Stahl verfertigte Magnete heißen künstliche Magnete. Um die Gesetze des Magnetismus zu untersuchen, wendet man am besten künstliche Magnete an, weil man ihnen leicht eine zweckmäßige Form geben kann. Gewöhnlich haben die künstlichen Magnete die Gestalt von Stäben, Nadeln, oder von Hufeisen.

Taucht man einen Magnetstab in Eisenfeilspäne, so wird man sehen, daß sie sich an den Magneten anhängen, daß sie aber nicht überall gleich gut hängen bleiben; in der Mitte des Stabes fallen sie gleich ab; hier scheint der Magnetstab gar keine anziehende Wirkung auf die Feilspäne auszuüben; von der Mitte nach den Enden, den Polen des Magneten hin nimmt die anziehende Kraft zu, indem hier mehr und mehr Feilspäne hängen bleiben, wie dies Fig. 346 andeutet.

Fig. 346.

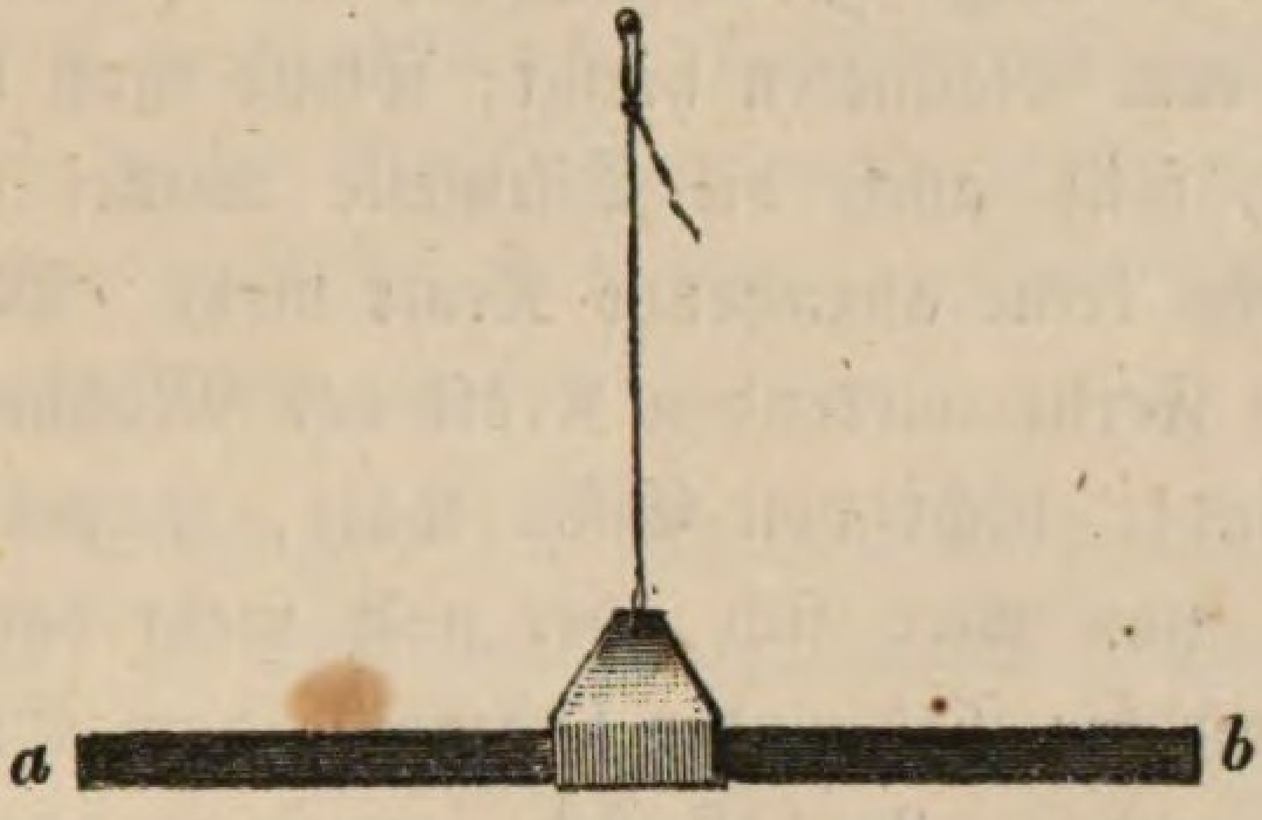


Man sollte auf den ersten Anblick meinen, daß,

wenn man einen Magneten nach seiner Mittellinie durchbricht (mit einem magnetisirten Stahldrahte kann man den Versuch leicht anstellen), alsdann jedes einzelne Stück kein vollständiger Magnet mehr seyn könnte, daß es nur an dem einen Ende Eisen anziehen könnte, am anderen aber nicht; der Versuch zeigt aber das Gegentheil: jedes Stück ist wieder ein vollständiger Magnet, welcher seine Mittellinie und seine Pole hat.

Die gleichnamigen Pole stoßen sich ab, die ungleichnamigen 156
ziehen sich an. Die Fig. 347 stellt einen Magneten dar, welcher, in einer Kapsel von Papier oder Metall liegend horizontal aufgehangen ist. Wenn man nun jedem der beiden Pole *a* und *b* denselben Pol eines anderen Magneten nähert, so wird etwa der Pol *a* angezogen, während *b* abgestoßen wird. Man nennt nun die Pole *a* und *b* ungleichnamig, weil sie verschieden auf denselben ihnen genäherten Pol wirken. Wenn man nun den Magneten, den man in der Hand hielt, umkehrt, um seinen anderen Pol dem aufgehängten zu nähern, so wird das Umgekehrte stattfinden: *a* wird abgestoßen und *b* angezogen. Die beiden Pole des bei diesem Versuche in der Hand gehaltenen Magneten sind also auch verschiedener Natur, sie sind auch ungleichnamig. Ebenso läßt sich zeigen, daß die beiden Pole eines jeden Magneten ungleichnamig sind.

Fig. 347.



Nähert man dem aufgehängten Magneten nach einander zwei verschiedene Magnete, so wird es leicht seyn, an jedem derselben denjenigen Pol zu finden, welcher den Pol *a* des aufgehängten Magneten anzieht, *b* aber abstößt. Bezeichnen wir diesen Pol des ersten Magneten mit *n*, den Pol des zweiten Magneten aber, welcher eben so wirkt, mit *n'*, so sind *n* und *n'* die gleichnamigen Pole dieser beiden Magnete. Ebenso sind die beiden anderen Pole *m* und *m'* dieser beiden Magnete gleichnamig.

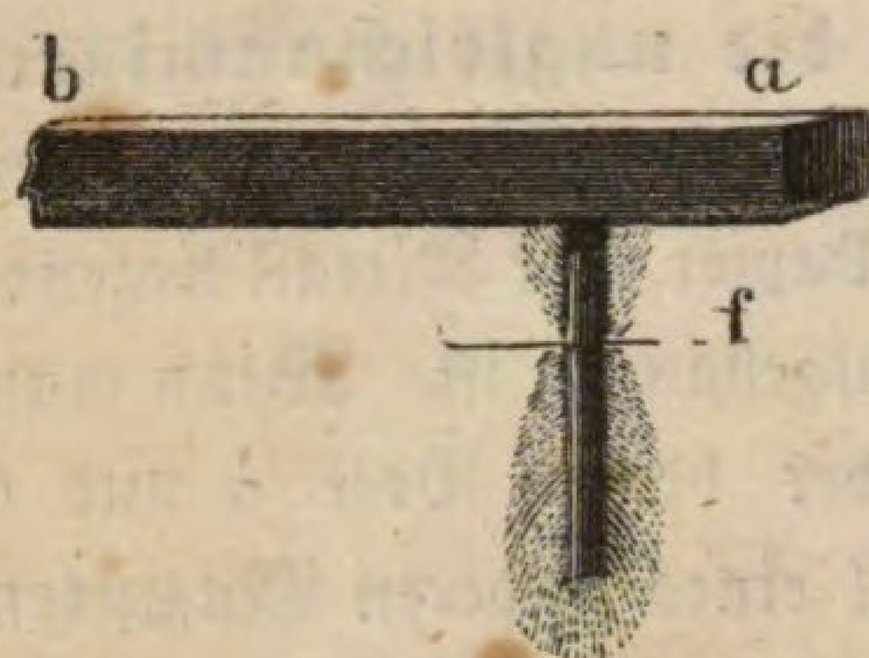
Hängt man jetzt den Magneten, dessen Pole wir mit *m* und *n* bezeichnet haben, so auf, daß er sich in einer horizontalen Ebene frei drehen kann, nähert man ihm den anderen, so findet man, daß sich die Pole *m* und *m'* abstoßen; dasselbe Verhalten findet zwischen den Polen *n* und *n'* Statt, die gleichnamigen Pole stoßen sich also ab. Dagegen ziehen sich die ungleichnamigen Pole *m* und *n'*, *n* und *m'* einander an.

In den beiden Hälften also, in welche ein Magnet durch die Mittellinie zerlegt wird, liegen zwei Kräfte, welche anfangs ganz gleichartig schienen, weil sie auf gleiche Weise auf das Eisen wirken, die aber in der That zwei ganz entgegengesetzte Kräfte sind. Die Mittellinie ist also die Gränze zweier entgegengesetzten Kräfte, sie bildet den Uebergang von der einen zur anderen, und darin liegt auch die Ursache ihrer neutralen Beschaffenheit.

Aus Gründen, die wir weiter unten kennen lernen, nennt man den einen Pol des Magneten den Nordpol, den anderen den Südpol.

157 **Unter dem Einflusse eines Magneten wird das Eisen selbst magnetisch.** Um diese Eigenschaft des Eisens zu beweisen, kann man den folgenden Versuch anstellen. Ein eiserner Cylinder *f*, Fig. 348, sey durch einen Magneten *a b* getragen; wenn man nun dem unteren Ende dieses Cylinders Eisenfeile nähert, so hängt sie sich in Form eines Büschels an und bleibt so lange daran hängen, als der kleine Cylinder an dem Magneten hängt; sobald man ihn aber abreißt, fällt auch die Eisenfeile wieder ab, man beobachtet keine anziehende Kraft mehr. Man kann diese Erscheinung nicht der in die Ferne wirkenden Kraft des Magneten zuschreiben; denn wenn der kleine Cylinder nicht von Eisen wäre, so würde man diese Erscheinung nicht beobachten; man wird sich aber noch mehr davon überzeugen, wenn man beobachtet: 1) daß die Fäden der Eisenfeile vom Ende des kleinen Cylinders an immer kleiner werden; 2) daß sich gegen sein oberes Ende hin ein Punkt findet, wo die Eisenfeile gar nicht mehr anhängt, daß der kleine Cylinder also eine magnetische Mittellinie hat; 3) daß über diesen Punkt hinaus die Eisenfeile wieder anhängt, daß die Fäden aber eine entgegengesetzte Richtung haben. Der kleine Cylinder ist also ein förmlicher Magnet, er zieht Eisenfeile an, er hat zwei Pole und eine Mittellinie, nur fällt diese magnetische Mittellinie nicht mit der geometrischen Mitte zusammen.

Fig. 348.



Anstatt dem angehängten Cylinder Eisenfeile zu nähern, kann man einen ähnlichen Cylinder anhängen, Fig. 349, welcher auch getragen wird; an diesen kann man einen dritten hängen, welcher wieder einen vierten trägt u. s. w. Man kann auf diese Weise eine Kette bilden, deren erstes Glied der Magnet ist. Nimmt man dieses Glied weg, so fällt die ganze Kette auseinander, weil keine Kraft mehr da ist, welche die Glieder zusammenhält.

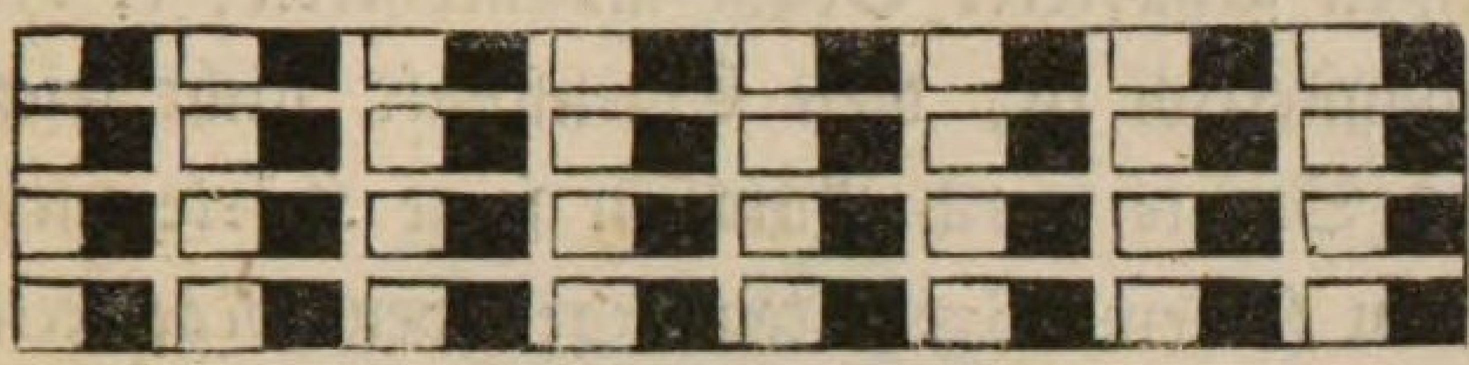
Fig. 349.



158 **Magnetische Flüssigkeiten.** Um die verschiedenen Erscheinungen des Magnetismus zu erklären, nimmt man an, daß es zwei verschiedene unwägbare (imponderabele) magnetische Flüssigkeiten gebe, welche in einer sogleich näher zu betrachtenden Weise in einem Magneten vertheilt sind; die Theilchen einer jeden Flüssigkeit stoßen einander ab, sie ziehen aber die Theilchen der entgegengesetzten an. Die magnetischen Flüssigkeiten sind in jedem Eisen- und Stahlmoleküle in gleicher Menge vorhanden, sie können aber nicht von einem Magnet auf ein Stück Eisen, oder nur von einem Molekül auf ein anderes übergehen; der magnetische Zustand hängt bloß davon ab, wie die magnetischen Flüssigkeiten in jedem einzelnen Moleküle vertheilt sind.

Einen Magneten oder einen magnetisirten Eisenstab müssen wir uns, wie Fig. 350 anschaulich macht, aus kleinen Theilchen zusammengesetzt denken, deren jedes die beiden Fluida, aber im getrennten Zustande, enthält; und zwar findet die Vertheilung der magnetischen Fluida in jedem Theilchen in der Weise Statt, daß das gleichartige Fluidum in allen Theilchen nach derselben Seite hingekehrt ist. An dem linken Ende des Fig. 350 dargestellten Magneten ist also nur die eine, am rechten Ende nur die andere Flüssigkeit vorhanden; die Polarität des Magneten ist also erklärt. Man begreift nach dieser Vorstellungsweise recht gut, daß wenn man einen Magneten in Theile zerbricht, daß alsdann jedes Stück wieder für sich ein vollständiger zwei Magnet seyn muß.

Fig. 350.



Wenn also ein Stück Eisen durch den Einfluß eines Magneten magnetisirt wird, so geht kein magnetisches Fluidum vom Magneten auf das Eisen über, sondern die Nähe des Magneten veranlaßt bloß eine Vertheilung der magnetischen Flüssigkeiten im Eisen, welche bis dahin in jedem Moleküle nicht getrennt und nach einer bestimmten Seite gerichtet, sondern ganz gleichförmig verbreitet waren.

Das Eisen behält nur so lange seine magnetischen Eigenschaften, als die Nähe eines Magneten die magnetischen Fluida getrennt erhält; sobald der Magnet entfernt wird, verbinden sich die getrennten Fluida wieder, das Eisen kehrt in seinen natürlichen Zustand zurück.

Ein horizontaler Magnet *a b*, Fig. 351, trage an seinem Ende ein Eisenstäbchen *f*, dessen Gewicht der Gränze dessen ziemlich nahe liegt, was der Magnet überhaupt zu tragen im Stande ist. Von Oben her nähere man nun einen anderen Magneten *a' b'* von gleicher Stärke, aber so, daß die entgegengesetzten Pole *a* und *b'* einander zugekehrt sind. Wenn man nun diesen zweiten Magneten auf die erwähnte Art allmälig nähert, so fällt das Eisenstück *f* herab. Die beiden Magnete zusammengenommen können also nicht tragen, was jeder für sich zu tragen vermag. Man sieht den Grund davon leicht ein: der zweite Magnet zerstört die Wirkung des ersteren, indem er die Flüssigkeiten der Eisenmasse *f* in entgegengesetztem Sinne zerlegt.

Fig. 351.



Der Stahl widersteht dem magnetisirenden Einflusse eines Magneten weit stärker als Eisen, d. h. durch Annäherung eines Magneten wird ein Stahlstück, namentlich wenn es etwas groß ist, nicht gleich so stark magnetisch wie ein Eisenstück; um einen Stahlstab vollständig zu magnetisiren, muß er mit dem Magneten längere Zeit in Berührung seyn, oder er muß mit demselben mehrmals in geeigneter Weise gestrichen werden; wenn aber der Stahl einmal

magnetisch ist, so verliert er diese Eigenschaft auch so leicht nicht wieder; man kann also von Stahl bleibende Magnete machen, aber nicht von Eisen.

Am schwersten läßt sich vollkommen gehärteter Stahl magnetisiren; er verliert aber auch, wenn er einmal magnetisch ist, diese Eigenschaft nicht leicht wieder. Wenn man dem gehärteten Stahle durch Anlassen seine Härte mehr und mehr nimmt, so nähert er sich in seinem Verhalten gegen den Magnetismus mehr und mehr dem weichen Eisen.

Weißglühendes Eisen wird von einem Magneten nicht mehr angezogen, wohl aber rothglühendes. Ein Stahlmagnet verliert durch Glühen seine magnetischen Eigenschaften vollständig.

Außer Eisen können auch Nickel und Kobalt magnetisch werden.

159 **Magnetische Armaturen.** Durch verschiedene Umstände kann ein Magnet nach und nach seine Kraft verlieren. Um dies zu verhindern, wendet man die sogenanten Armaturen an; mit diesem Namen bezeichnet man Stücke von weichem Eisen, welche man mit dem Magneten in Berührung bringt, um sie selbst durch die im weichen Eisen hervorgebrachte magnetische Zersetzung in Thätigkeit zu erhalten. Um Magnetstäbe zu armiren, verfährt man am besten so, wie man aus Fig. 352 sieht. Man legt zwei gleiche Magnetstäbe parallel so neben einander, daß immer der Nordpol des einen nach derselben Seite gerichtet ist wie der Südpol des anderen, und fügt dann zwei Stücke von weichem Eisen *n s* und *n' s'* so an, daß dadurch das Parallelogramm geschlossen wird. Jedes dieser Eisenstücke wird nun natürlich selbst ein Magnet, der auf die Magnetstäbe *NS* und *N' S'* in der Weise zurückwirkt, daß dadurch die getrennten Flüssigkeiten an den entsprechenden Enden fixirt werden.

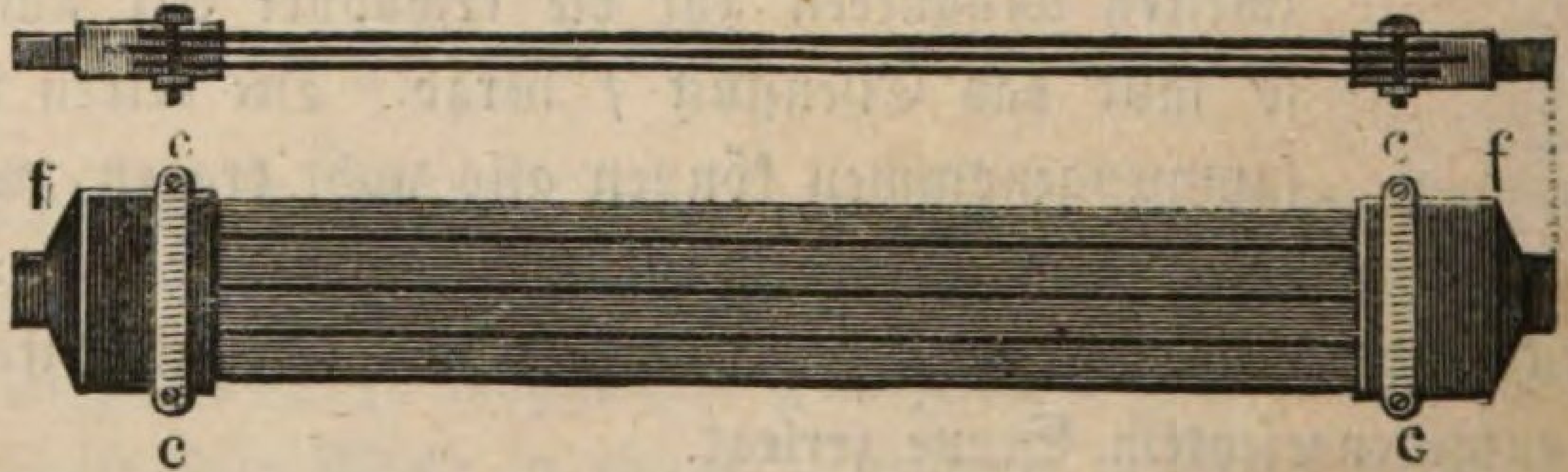
Fig. 352.



Magnetnadeln und Magnetstäbe, welche durch den Erdmagnetismus gerichtet sind, sind gewissermaßen durch die Erde armirt.

Ein magnetisches Magazin ist eine Verbindung von mehreren einzelnen Magnetstäben. Fig. 353 zeigt ein solches nach Coulomb's Methode construirtes.

Fig. 353.



Es besteht aus 12 einzelnen Magnetstäben, die 3 Schichten, jede von 4 Stäben, bilden. Die Stäbe der mittleren Schicht sind um 2,5 bis 3 Zoll länger als die der oberen und unteren, so daß sie ungefähr 15 bis 18 Linien auf jeder Seite vorstehen. Alle Stäbe haben übrigens vollkommen gleiche Dimensionen und sind in Eisenstücken *f* befestigt, die als Armatur dienen. Die Messingbänder *c c'* dienen dazu, die Stäbe und Armatur gehörig fest zu-

ammenzuhalten. Solche große Magnetbündel bleiben fest liegen, wenn man sich ihrer zum Magnetisiren bedient. Die kleineren, die man zum Streichen gebraucht, sind nach demselben Principe construirt.

Fig. 354.

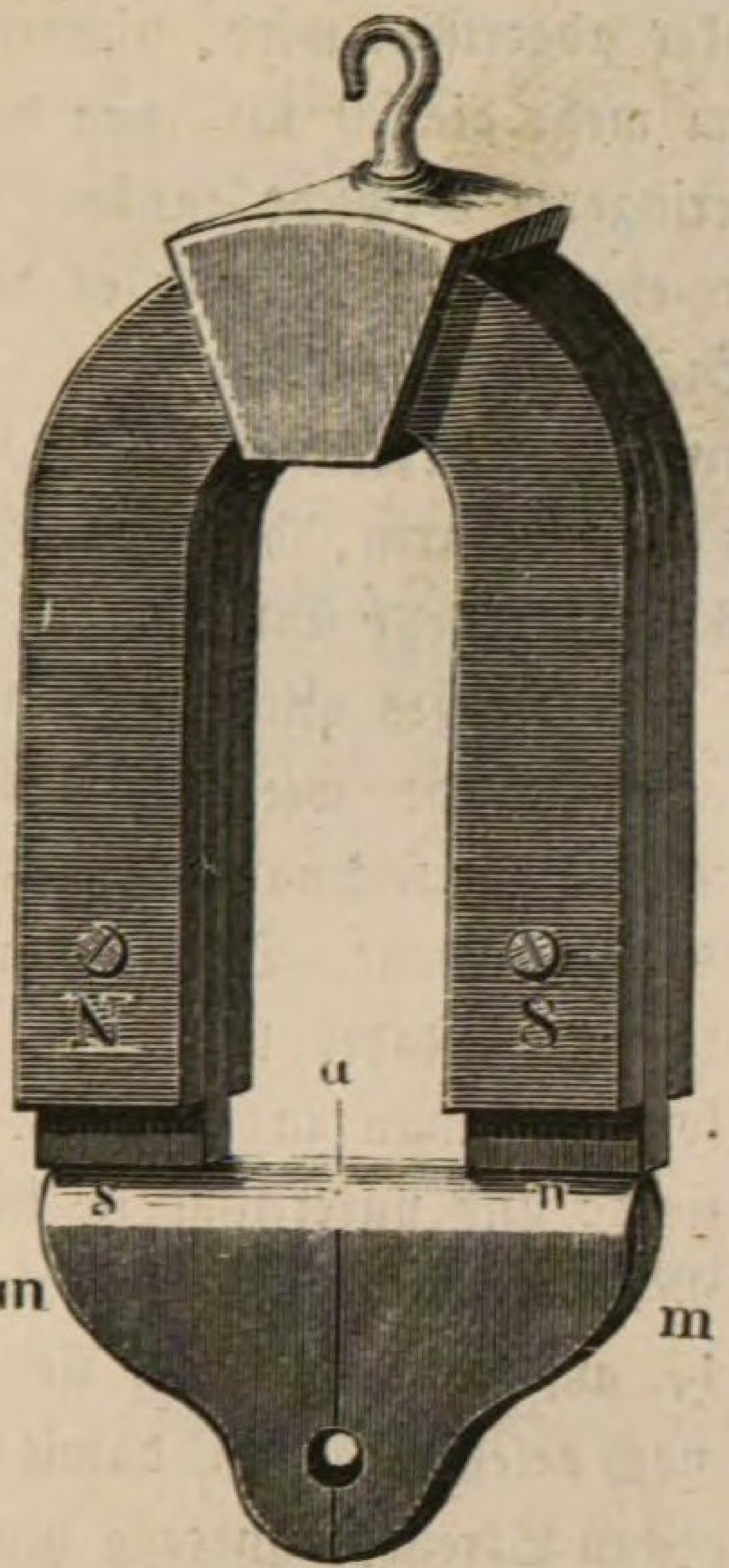


Fig. 354 stellt einen Hufeisenmagneten dar. Er besteht aus mehreren hufeisenförmig gebogenen Stahlplatten, welche unmittelbar auf einander gelegt werden. Zwei Schrauben halten sie zusammen. Jede Platte wird vor dem Zusammensetzen für sich magnetisirt. Der ganze Magnet wird an einem Haken aufgehängt. Der aus einer Platte von weichem Eisen gemachte Anker *m m'* bildet die Armatur.

Die Tragkraft eines zusammengesetzten Magneten ist keineswegs der Summe der Tragkräfte der einzelnen Lamellen gleich, aus denen er gebildet ist, sondern weit geringer. Der Grund davon ist leicht einzusehen. Legt man zwei gleichgeformte Stahlmagnete mit ihren gleichnamigen Polen auf einander, so strebt jeder, die Polarität des anderen umzukehren, was nothwendig eine gegenseitige Schwächung der magnetischen Kraft zur Folge hat. So kommt es denn auch, daß die Tragkraft der Magnete in einem weit geringeren Verhältniß wächst, als ihre Masse. Ein 4löthiger Hufeisenmagnet kann das 25fache, ein 100pfündiger nicht einmal das 3fache seines eigenen Gewichts tragen.

Die Armatur der natürlichen Magnete ist Fig. 355 und 356 dargestellt.

Fig. 355.

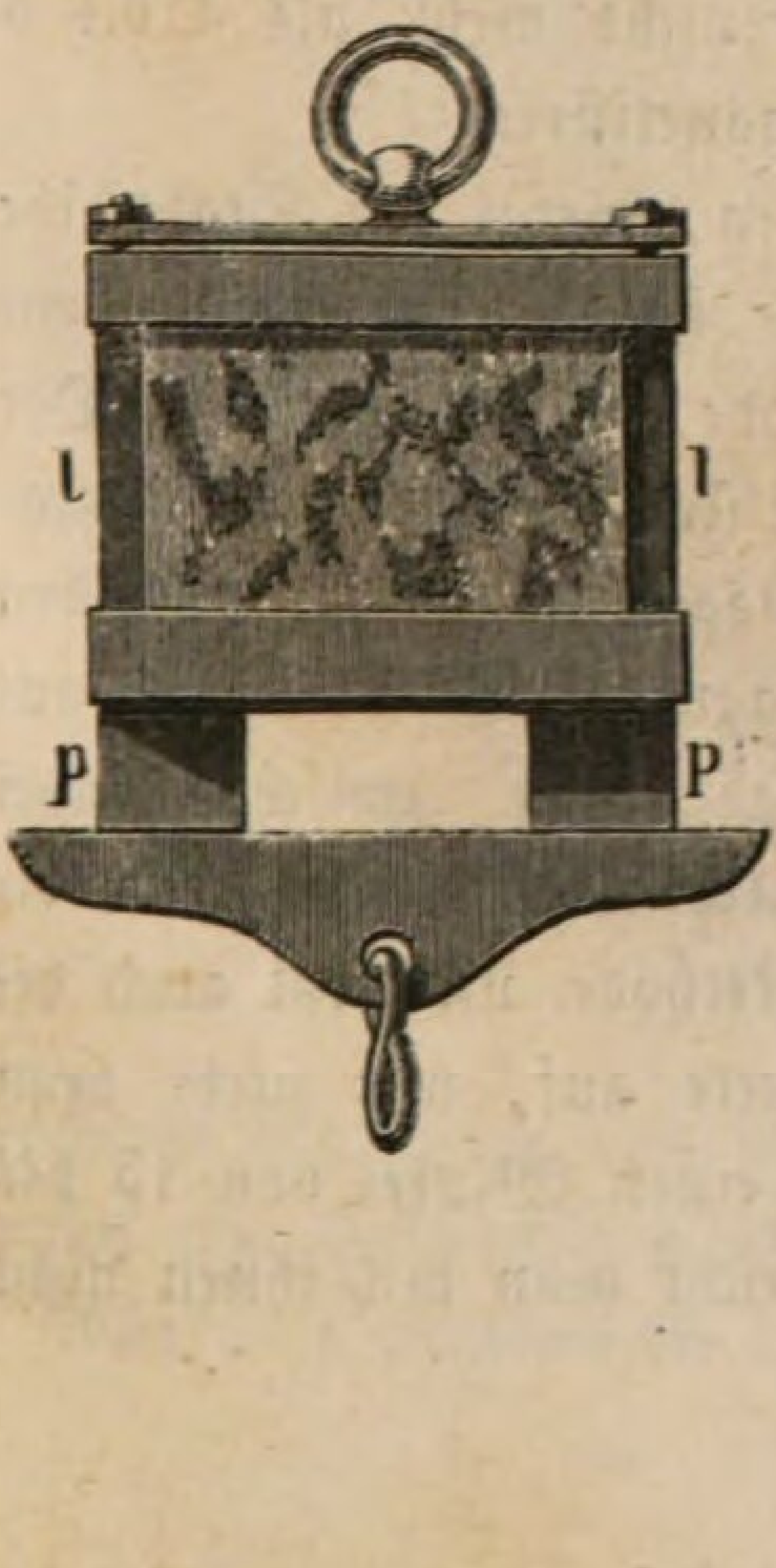


Fig. 356.



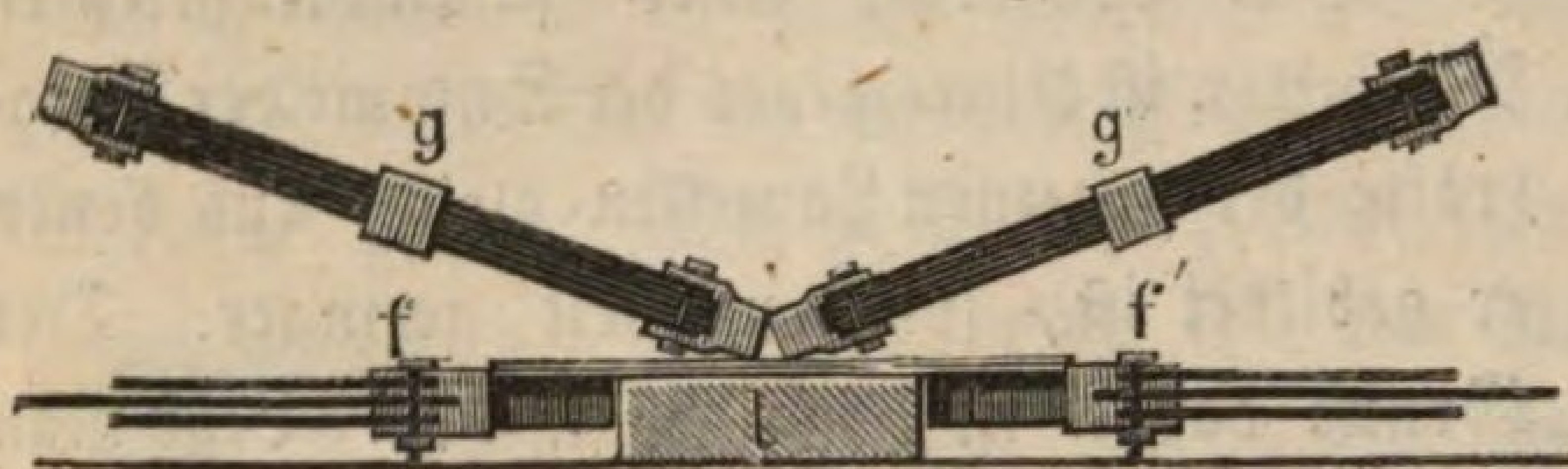
Die Theile *l* und *l'* sind die Flügel der Armatur, *pp'* die Füße. Man macht die Flügel fast so breit wie den Magneten und ungefähr eine Linie dick. Die Dimensionen der Füße hängen von der Stärke des Magneten ab.

Bei natürlichen Magneten sowohl wie bei künstlichen beobachtet man ein merkwürdiges Phänomen, welches man noch nicht genügend zu erklären weiß, nämlich die Schwäche, welche eine Ueberladung zur Folge hat. Nehmen wir an, ein Magnet könne 20 Kil.

tragen. Wenn man nun täglich ein kleines Gewicht zufügt, so kann man seine Tragkraft vermehren, man kann es dahin bringen, daß er 30, daß er 40 Kil. trägt; sobald aber durch ein zu großes Gewicht der Anker abgerissen wird, nimmt die Kraft des Magneten bedeutend ab, er trägt kaum mehr die 20 Kil., von denen man ausgegangen war. Wenn man aber ein geringeres Gewicht anhängt und dasselbe mit Vorsicht nach und nach wieder vermehrt, so kann man es dahin bringen, daß er nach einiger Zeit seine frühere Stärke wieder erhält.

161 **Magnetisirung von Stahlnadeln und Stahlstäben.** Die Methode des sogenannten getrennten Striches besteht darin, daß man zwei starke Magnetbündel von der Art, wie sie Fig. 353 dargestellt sind, so legt, daß die Axe des einen Bündels in die Verlängerung der Axe des anderen zu liegen kommt, und daß entgegengesetzte Pole einander zugekehrt sind, wie man Fig. 357 sieht, wo *f* den einen Pol des einen Bündels, *f'* den ungleichnamigen des anderen darstellt. Die zu magnetisirende Nadel legt man nun so, wie man in der Fig. 357 sieht, und unterstützt sie in der Mitte noch durch ein Holzstück *l*, auf welchem man sie auch noch befestigen kann, damit keine Verrückung möglich ist.

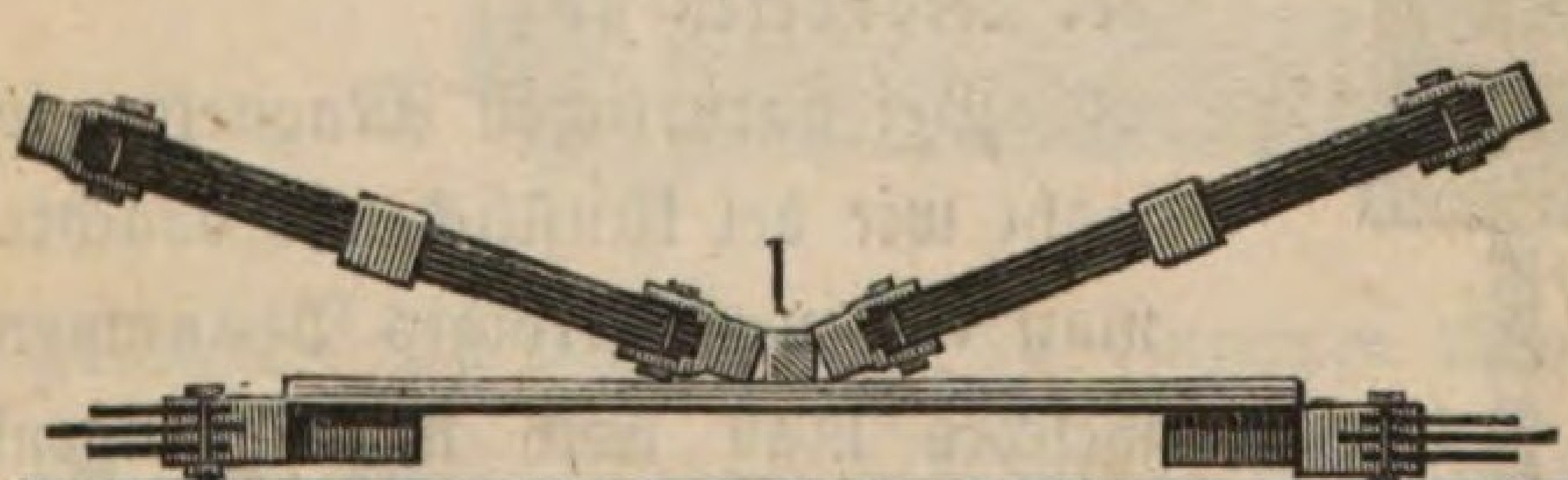
Fig. 357.



Nun nimmt man die beiden Streichmagnete *g* und *g'*, den einen in die rechte, den anderen in die linke Hand, setzt sie 25 bis 30 Grad gegen die Horizontale geneigt in der Mitte des zu magnetisirenden Stabes auf, streicht alsdann mit langsamer regelmäßiger Bewegung von der Mitte aus gegen die Enden, so daß die Magnetbündel *g* und *g'* gleichzeitig an den entgegengesetzten Enden der Nadel ankommen; hier hebt man sie ab, setzt wieder in der Mitte auf und wiederholt dann dasselbe Verfahren mehrere Mal. Es versteht sich von selbst, daß die Streichmagnete die Nadel mit demjenigen Pole berühren müssen, nach welchem man sie hinführt. Diese Methode ist besonders geeignet, um Magnetnadeln für Bussolen oder Stahlstäbe, welche nicht mehr als 4 bis 5 Millimeter dick sind, regelmäßig und vollständig zu magnetisiren.

Die Methode des Doppelstriches ist anzuwenden, wenn die Stahlstäbe mehr als 4 bis 5 Millimeter dick sind; denn für diese ist die eben beschriebene Methode unzureichend. Der Doppelstrich wird folgendermaßen ausgeführt. Man legt den zu magnetisirenden Stab auf dieselbe Weise zwischen zwei Magnetbündel, wie bei der vorigen Methode, und setzt auch die beiden Streichmagnete auf dieselbe Weise in der Mitte auf, nur giebt man ihnen eine noch geneigtere Stellung, so daß sie nur einen Winkel von 15 bis 20 Grad mit der Horizontalen machen. Alsdann streicht man mit ihnen nicht

Fig. 358.



nach den entgegengesetzten Polen, sondern man bewegt beide nach demselben Stabende hin, alsdann zurück den ganzen Stab entlang. Nachdem man sie auf diese Weise zusammen hinlänglich oft über den Magneten hin und her geführt hat, hebt man sie von der Mitte des Stabes wieder ab. Um diese Operation bequemer zu bewerkstelligen, kann man die beiden Streichmagnete auf einer Art Dreieck von Holz oder Messing befestigen; auf jeden Fall aber muß zwischen den unteren Enden der Streichmagnete ein Zwischenraum von 5 bis 6 Millimetern seyn, den man am besten durch ein Stückchen Holz, Messing oder Blei sichert, welches in unserer Figur durch *l* bezeichnet ist.

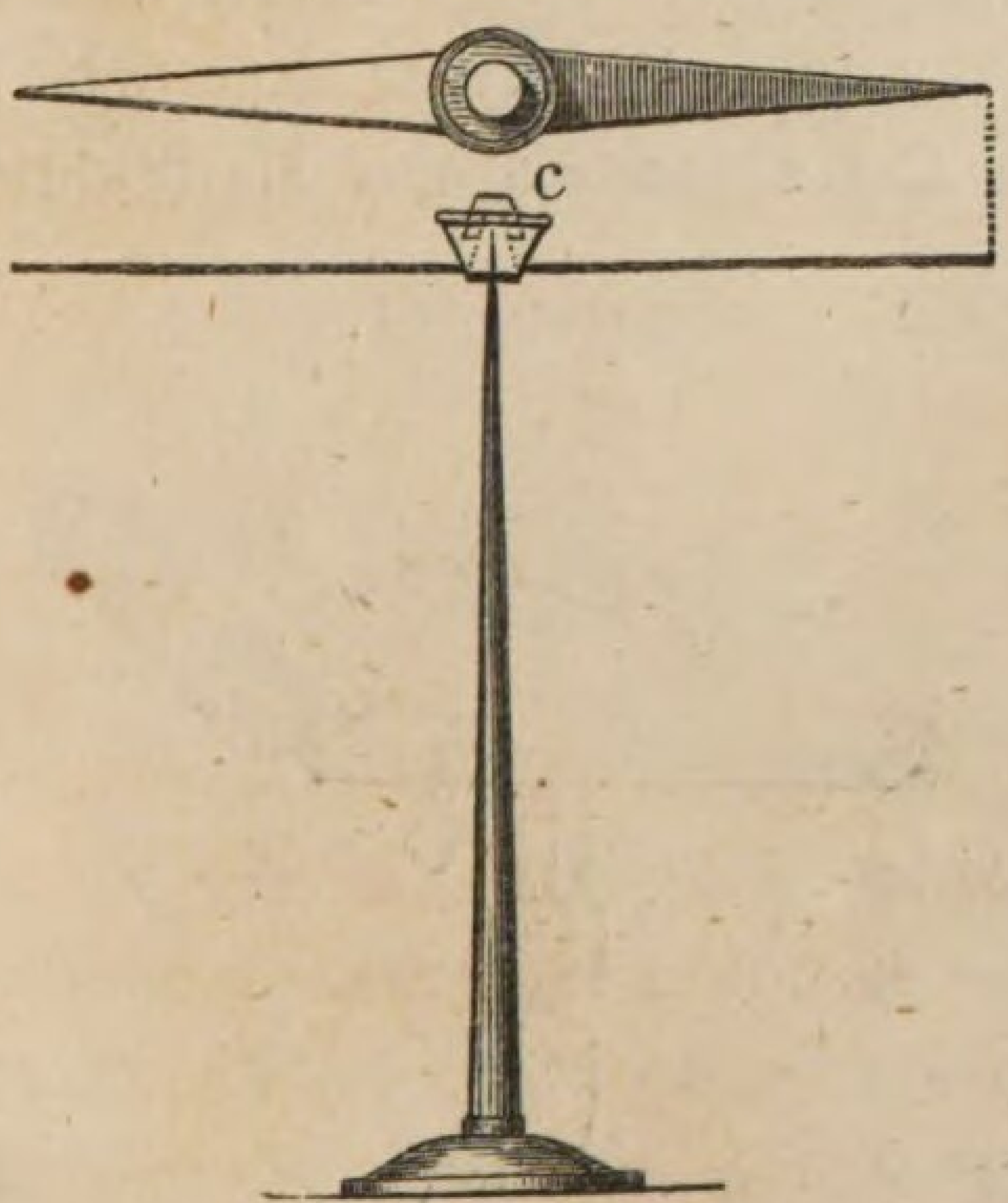
Der Doppelstrich giebt einen starken Magnetismus; er darf aber zum Magnetisiren von Nadeln für Bussolen und Stäbe, welche zu genauen Untersuchungen dienen sollen, nicht angewendet werden, weil er fast immer ungleich starke Pole giebt und leicht Folgepunkte veranlaßt.

Zweites Kapitel.

Von den magnetischen Wirkungen der Erde.

Richtung der Magnete, Declination, Inclination. Ein an 161
einem Seidenfaden horizontal aufgehängter Magnetstab oder eine in horizontaler Ebene auf einer Spitze leicht drehbare Magnetnadel (eine solche Magnetnadel hat gewöhnlich die Form einer Raute, wie Fig. 359; in der Mitte ist auf derselben ein Achathütchen angebracht, welches auf die Stahlspitze gesetzt wird, die den Drehpunkt der Nadel bildet) ist nicht in jeder Lage im Gleichgewichte, sie nimmt eine bestimmte Stellung ein, indem sie sich gegen einen bestimmten Punkt des Horizonts richtet. Wenn man sie aus dieser Lage herausbringt, so kehrt sie doch immer nach einer Reihe von Oscillationen in dieselbe zurück. Die Kraft, welche die Nadel immer wieder in diese Lage zurückführt, ist eine magnetische; denn eine nicht magnetisirte Nadel zeigt nichts der Art. Diese merkwürdige Eigenschaft der Magnetnadeln beobachtet man überall; in allen Welttheilen, auf allen Meeren, auf den höchsten Gipfeln der Berge und in den tiefsten Schachten, überall nimmt die Magnetnadel eine bestimmte Richtung an, in welche sie immer wieder zurückkehrt, wenn

Fig. 359.



man sie auch daraus entfernt. Es giebt also eine magnetische Kraft, welche an allen Punkten der Erdoberfläche thätig ist; denn die Magnetnadeln können sich nicht selbst richten, so wenig wie sich ein Körper selbst in Bewegung setzen kann.

Wir können durch einen einfachen Versuch darthun, daß diese richtende Kraft ganz in der Art wirkt wie ein Magnet und nicht wie eine Eisenmasse. Wenn man die Magnetnadel in horizontaler Ebene aus ihrer Gleichgewichtslage um 180° herausdreht, so ist sie in ihrer neuen Lage nicht im Gleichgewichte, sie wird einen vollständigen Halbkreis beschreiben, um wieder in die Gleichgewichtslage zurückzukehren und ihre ursprüngliche Richtung wieder anzunehmen. Die richtende Kraft unterscheidet also die Pole, und, gerade wie ein Magnet, zieht sie den einen Pol an und stößt den anderen ab, während das Eisen sowohl den einen als auch den anderen Pol eines Magneten mit gleicher Stärke anzieht.

Indem man alle die verschiedenen Beobachtungen zusammenfaßt, welche an verschiedenen Orten gemacht worden sind, wird man wirklich dahin geleitet, die Erde als einen großen Magneten anzusehen, dessen Mittellinie in den Aequatorialgegenden liegt. Dies giebt uns ein Mittel, die beiden Pole eines Magneten passend zu bezeichnen.

Die beiden Pole des großen Erdmagneten fallen in die Nähe der Pole der Erdaxe; deshalb ist das eine Nadelende nach Norden gerichtet und wird der Nordpol der Nadel genannt, während das entgegengesetzte Nadelende der Südpol ist.

Der magnetische Meridian ist diejenige vertikale Ebene, welche man sich durch die Richtungslinie eines horizontalen Magneten gelegt denken kann, oder auch nur der Durchschnitt dieser Ebene mit der Erdoberfläche. Der magnetische Meridian eines Ortes macht nun mit dem astronomischen Meridian einen Winkel, welchen man die Declination oder Abweichung nennt. Die Declination ist östlich oder westlich, je nachdem die Magnetnadel nach der einen oder nach der anderen Seite des astronomischen Meridians abweicht. In Fig. 360 z. B. stellt sn den Meridian eines Ortes dar, ab aber die Richtung

Fig. 360.

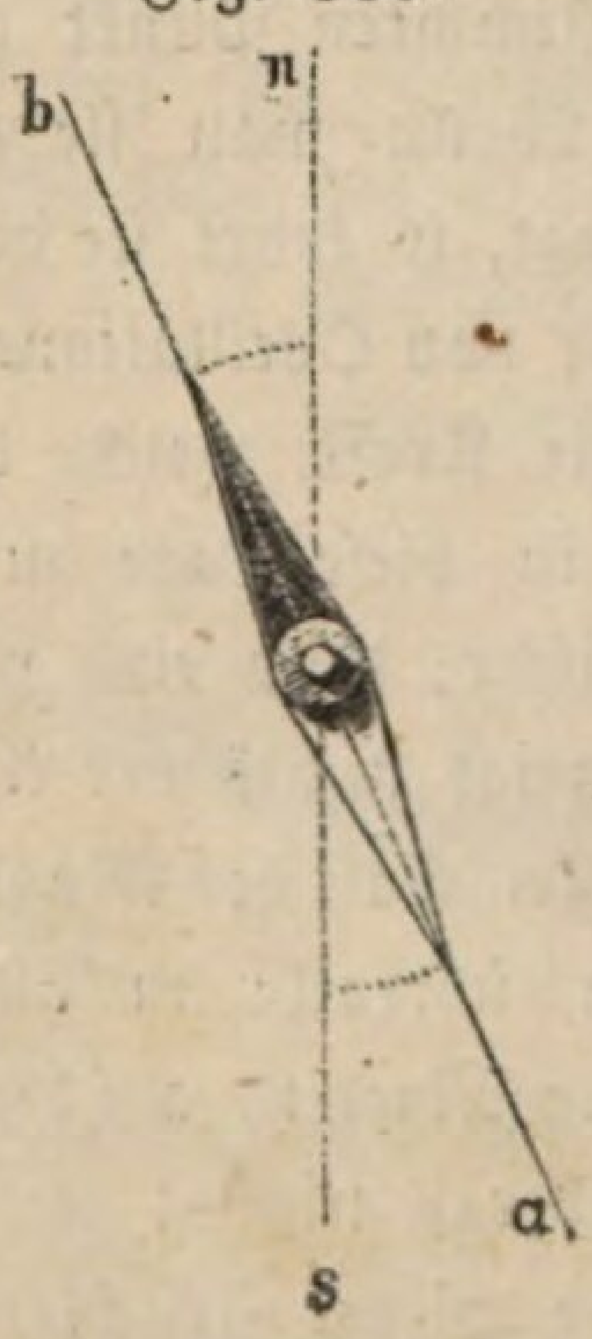
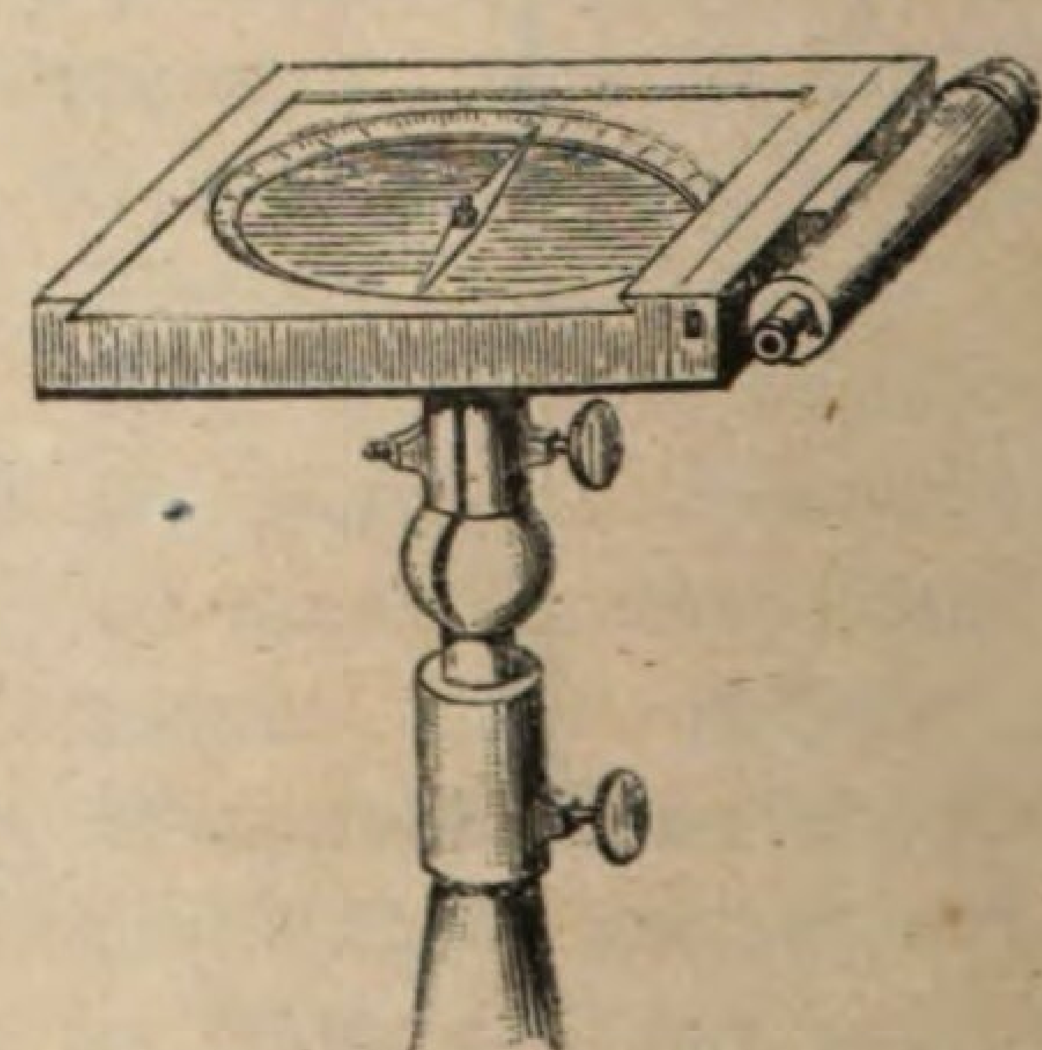


Fig. 361.



der horizontalen Magnetnadel an demselben Orte. Die westliche Declination betrug zu Göttingen im Januar 1837 18° 37′ 30,55″; wir werden bald sehen, daß die Declination mit der Zeit sich ändert. Es giebt Orte auf der Erde, wo die Richtung der Magnetnadel vollständig mit dem Meridian zusammenfällt; an diesen Orten ist natürlich die Declination gleich Null.

Jeder Apparat, welcher dazu dient, die Declination zu messen, heißt eine Declinationsbussole.

Fig. 361 stellt eine solche Bussole ziemlich einfacher Art vor. Die Spitze, auf welche die Nadel aufgesetzt ist, ist der Mittelpunkt eines getheilten Horizontalkreises, welcher um eine vertikale Axe in seiner eigenen Ebene umgedreht werden kann. An der Seite des Gehäuses ist ein Fernrohr angebracht, dessen Axe mit derjenigen Linie parallel läuft, welche man sich vom Nullpunkte des getheilten Kreises über seinen Mittelpunkt zum Theilstriche 180° gezogen denken kann. Je nachdem man den Horizontalkreis in seiner Ebene umdreht, wird die Spitze der Magnetnadel bei anderen Theilstrichen zu stehen kommen. Wenn man den Apparat so stellt, daß die Nadel gerade auf den Nullpunkt der Theilung zeigt, so ist die Axe des Fernrohrs mit der Nadel parallel, sie fällt mit dem magnetischen Meridiane zusammen; bei jeder anderen Stellung aber zeigt die Nadel auf denjenigen Theilstrich des Kreises, welcher angiebt, wieviel Grade der Winkel beträgt, welchen die Richtung der Nadel mit der Axe des Fernrohrs (oder vielmehr mit der Horizontalprojection der Fernrohraxe) macht; wenn man also das Fernrohr genau in den astronomischen Meridian bringt, so kann man auf dem Theilkreise ablesen, welchen Winkel der magnetische Meridian mit dem astronomischen macht.

Dieses Instrument kann nun überhaupt als Winkelmeßinstrument dienen, weil man mit Hülfe desselben jederzeit den Winkel bestimmen kann, welchen die Visirlinie des Fernrohrs (oder vielmehr ihre Horizontalproportion) mit dem magnetischen Meridiane macht.

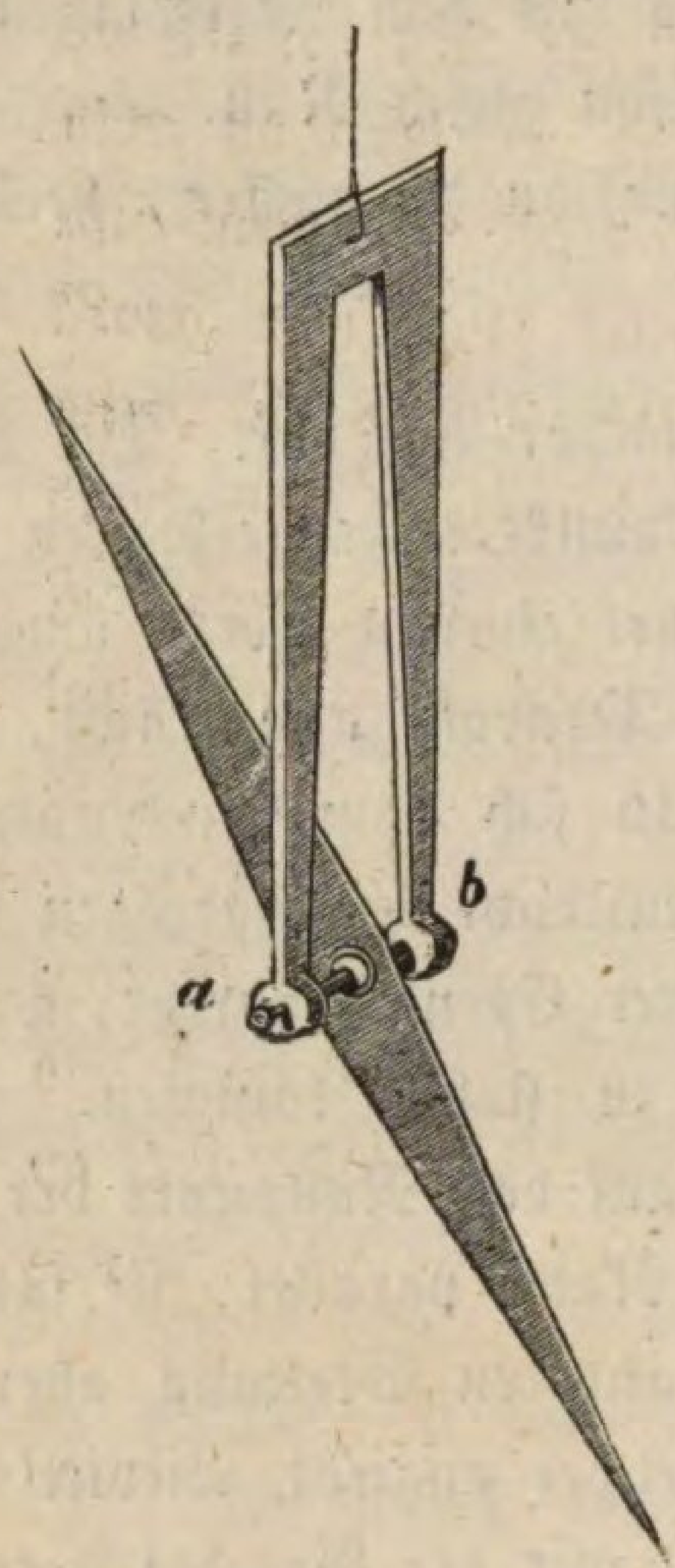
Die Declinationsbussole, deren sich die Seefahrer bedienen, ist unter dem Namen des Compasses bekannt.

Im Ganzen nähert sich die Richtung der Magnetnadel mehr der Richtung von Norden nach Süden als von Osten nach Westen, daher man denn gewöhnlich sagt, die Magnetnadel zeigt nach Norden.

Die Magnetnadeln, welche wir bisher betrachtet haben, sind in einer Weise aufgehängt, daß sie sich nur in einer horizontalen Ebene, also um eine vertikale Axe drehen können. Sowohl bei der Fig. 347, als auch Fig. 359 dargestellten Aufhängung ist die horizontale Stellung dadurch gesichert, daß der Schwerpunkt der Nadel unter dem Aufhängepunkte liegt. Sobald man aber eine Magnetnadel in ihrem Schwerpunkte selbst aufhängt, so bleibt sie nicht mehr wagerecht stehen, sondern sie macht einen Winkel mit der Horizontalen, welcher den Namen der Inclination führt.

Der Fig. 362 abgebildete Apparat ist sehr geeignet, die Inclination der Magnetnadel zu zeigen. An einem Rahmen von Messing, welcher an einem Faden aufgehängt ist, befindet sich eine sehr leicht bewegliche horizontale Axe *a b*, welche durch den Schwerpunkt einer Magnetnadel geht. Man sieht, daß eine so aufgehängte Magnetnadel um eine vertikale und um eine horizontale Axe sich drehen und also dem richtenden Einflusse der Erde ganz frei folgen kann. Die Nadel stellt sich nun so, daß ihre Richtungslinie in den magnetischen Meridian fällt, das nach Norden gekehrte Ende der Nadel aber senkt sich, die Richtungslinie der Nadel macht also einen Winkel mit der Horizontalen, der in unseren Gegenden ungefähr 70° beträgt.

Fig. 362.

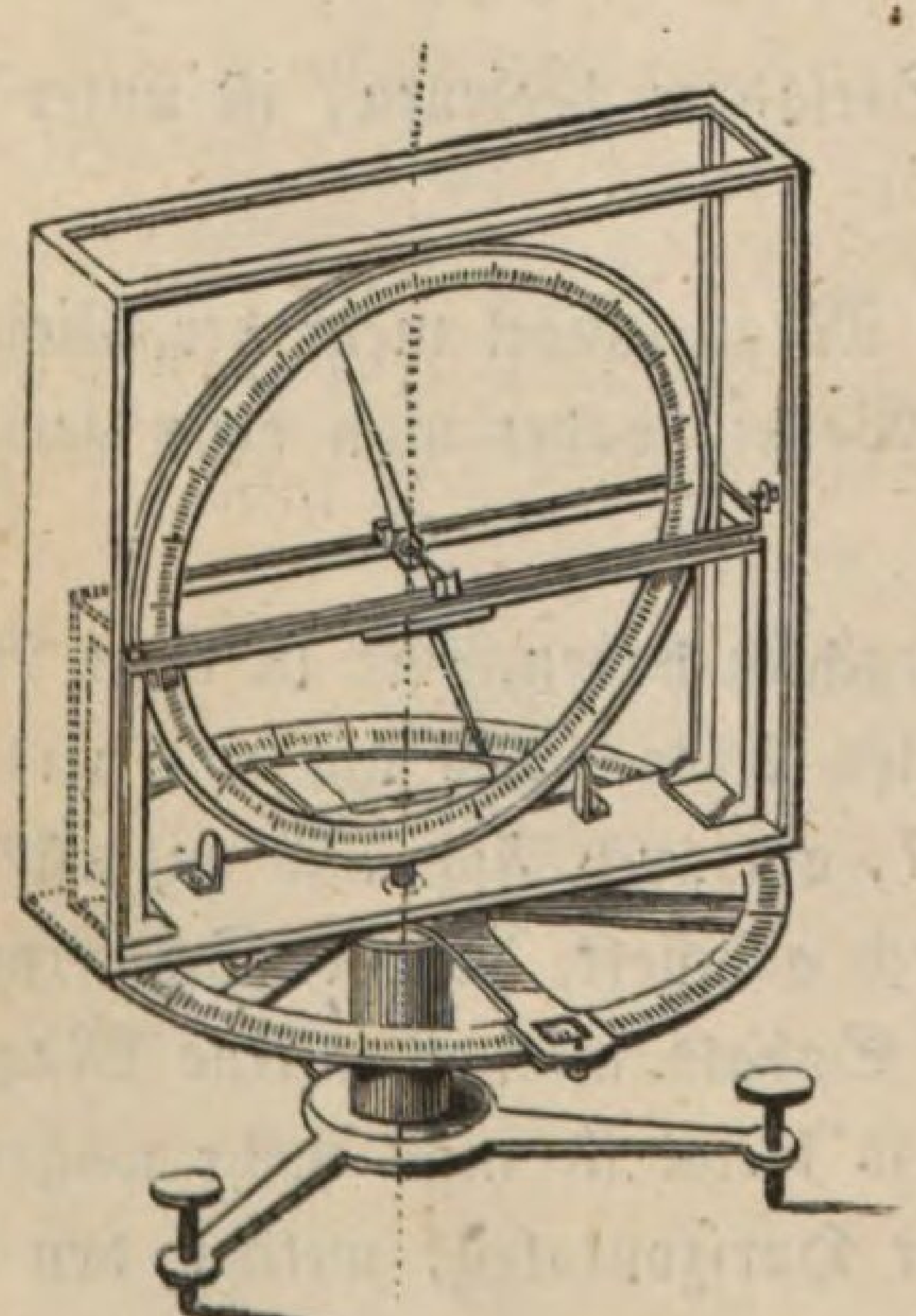


Wenn die Inclinationsnadel in einem getheilten Vertikalkreise, dessen Ebene mit der Umdrehungsebene der Nadel zusammenfällt, angebracht ist, wie Fig. 363, so kann man auf diesem Kreise die Größe der Inclination ablesen, wenn man dafür sorgt, daß die Ebene des Vertikalkreises genau in den magnetischen Meridian fällt.

Solche Apparate, welche dazu dienen, die Inclination zu messen, heißen **Inclinatorien** oder **Inclinationsbussolen**.

Die Größe der Inclination nimmt im Allgemeinen zu, je mehr man nach Norden kommt; in der Nähe der Erdpole nimmt die Inclinationsnadel eine fast senkrechte Stellung an; so beobachtete z. B. Capitän **Philipps** im Jahre 1773 unter 79° 44′ nördlicher Breite eine Inclination von 82° 9′, und **Parry** unter 70° 47′ eine Inclination von 88° 43′. Capitän **Roß** endlich hat den magnetischen Nordpol der Erde selbst erreicht. Unter 70° 5′ n. B. und 263° 14′ östlich von Greenwich fand er die Declination 90°. Die Neigung der Magnetnadel ist in hohen Breiten so bedeutend, daß der Compaß für die Seefahrer seine Brauchbarkeit verliert, wie durch die letzten Nordpolexpeditionen bewiesen ist.

Fig. 363.



Je weiter man hingegen nach Süden geht, desto mehr nimmt die Inclination ab, und in der Aequatorialzone kommt man zu einem Punkte, wo die Inclination Null ist, wo also die Inclinationsnadel vollkommen wagerecht steht geht man noch weiter nach Süden, so beobachtet man abermals eine Inclination, aber eine entgegengesetzte, es ist nun das nach Süden gekehrte Ende, welches sich tiefer stellt. Diese Inclination nimmt nun ebenfalls mit der südlichen Breite zu. In der Nähe des Südpols der Erde giebt es demnach einen zweiten Punkt, an welchem sich die Inclinationsnadel völlig vertikal stellt, und dies ist der magnetische Südpol der Erde.

In welcher geographischen Länge man auch die Aequatorialzone passiren mag, so wird man doch immer einen Punkt finden, wo die Inclinationsnadel wagerecht steht. Diese Orte ohne Inclination bilden um die ganze Erde eine Kurve, welche man den magnetischen Aequator nennt.

Der magnetische Aequator fällt nicht mit dem Erdäquator zusammen und bildet auch keinen regelmäßigen größten Kreis der Erdkugel.

Die Totalwirkung, welche die Erde auf eine Magnetnadel ausübt, ist nur eine richtende, aber keine anziehende; denn wenn Letzteres der Fall wäre, so müßte eine Magnetnadel mehr wiegen als vorher, da sie noch nicht magnetisch gemacht worden war. Wenn man eine Magnetnadel auf einen Kork legt, welcher auf dem Wasser schwimmt, so stellt sie sich in den magnetischen Meridian; sie zeigt aber kein Bestreben, nach Norden zu schwimmen, wie man vielleicht hätte erwarten können.

Nähert man der schwimmenden Nadel einen Magneten, so findet entweder eine Anziehung oder eine Abstoßung Statt, je nachdem man sich mit dem einen oder dem anderen Pole des Magneten nähert; die Nadel schwimmt dem Magneten entweder zu oder von ihm weg. Warum schwimmt nun die Nadel nicht dem magnetischen Nordpol zu, wenn sich doch die Erde nicht anders als ein großer Magnet verhält? Der Grund ist folgender: Die Kraft der magnetischen Anziehung nimmt mit der Entfernung ab, wie wir bald sehen werden. Wenn man nun einen Magneten der schwimmenden Nadel nähert, so sind die beiden Pole der Nadel nicht gleich weit vom genäherten Pole des Magneten entfernt, folglich muß entweder die abstoßende oder die anziehende Kraft überwiegen und mithin auch eine Fortbewegung erfolgen. Der magnetische Nordpol der Erde ist aber nun von der schwimmenden Nadel so außerordentlich weit entfernt, daß die Länge der Nadel gegen diese Entfernung eine völlig verschwindende Größe ist; der eine Pol der Nadel wird also ebenso stark angezogen, als der andere abgestoßen wird.

Variationen der Declination und Inclination. Die Declination ist eben so wenig wie die Inclination unveränderlich; im Jahre 1580 war die Declination zu Paris 11° 30′ östlich; sie nahm nun ab und war im Jahre 1663 gleich Null; von dieser Zeit an wurde die Declination westlich und wuchs beständig bis zum Jahre 1814, wo sie ihr westliches Maximum von 22° 34′ erreichte, um alsdann wieder kleiner zu werden. 162

Die Inclination der Magnetnadel hat zu Paris vom Jahre 1671, wo sie ungefähr 75° betrug, fortwährend abgenommen, so daß sie gegenwärtig daselbst ungefähr $67\frac{1}{2}$° beträgt.

Diese ganz allmäligen Veränderungen der Declination und Inclination, welche die Folge einer langsamen Ortsveränderung der magnetischen Pole der Erde sind, nennt man seculare Variationen; es sind dies jedoch nicht die einzigen Veränderungen, welchen die Richtung der Declinationsnadel unterworfen ist.

Wenn man die Declinationsnadel aufmerksam beobachtet, so findet man, daß sie fortwährend kleine Oscillationen macht, indem sie sich bald östlich, bald westlich von ihrer Gleichgewichtslage entfernt; diese Schwankungen sind bald mehr regelmäßig und periodisch, bald mehr zufällig und plötzlich. Erstere sind die täglichen Variationen, letztere nennt man Störungen.

Im Allgemeinen bewegt sich das Nordende der Nadel vom Sonnenaufgange an nach Westen und beginnt dann von 5 Uhr Abends an seinen Rückweg.

Die Amplitude der täglichen Variationen, d. h. der Winkel zwischen dem östlichsten und westlichsten Stande, ist veränderlich; sie ist manchmal nur 5 bis 6 Secunden, manchmal aber beträgt sie auch $\frac{1}{2}$ Minute.

Auch die Inclination ist solchen täglichen Variationen unterworfen.

Sehr starke unregelmäßige Schwankungen, die oft mehr als einen Grad betragen, macht die Declinationsnadel, wenn sich ein Nordlicht am Himmel zeigt.

Erdbeben und vulkanische Eruptionen scheinen auch auf die Magnetnadel zu wirken, und manchmal haben sie eine bleibende Veränderung ihrer Lage zur Folge.

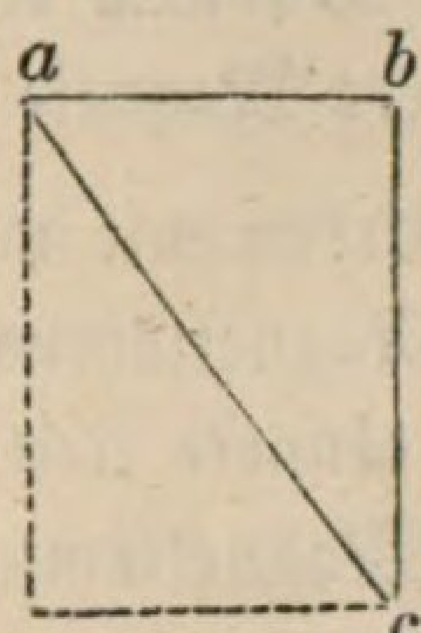
163 **Intensität des Erdmagnetismus.** Wenn eine Inclinationsnadel aus ihrer Gleichgewichtslage herausgebracht wird, so strebt der Erdmagnetismus sie wieder in dieselbe zurückzuführen; wenn man aber die Nadel ganz und gar sich selbst überläßt, so kommt sie erst nach einer Reihe von Schwingungen zur Ruhe. Die Zeit, welche zu einer jeden dieser Schwingungen nöthig ist, hängt ab von der Masse der Nadel, von der Stärke des in ihr entwickelten Magnetismus und von der Stärke des Erdmagnetismus. Eine und dieselbe Nadel wird also schneller oscilliren, wenn der Erdmagnetismus stärker auf sie einwirkt.

So hat man denn ein Mittel, die Stärke des Erdmagnetismus an verschiedenen Orten der Erde mit einander zu vergleichen; man hat nur zu beobachten, wieviel Oscillationen in einer bestimmten Zeit, etwa in fünf Minuten, eine und dieselbe Inclinationsnadel an verschiedenen Orten macht, und kann so nach dieser Beobachtung leicht berechnen, wie sich die Stärke des Erdmagnetismus an dem einen Orte zu der am anderen Orte verhält; denn die Intensitäten des Erdmagnetismus verhalten sich wie die Quadrate der in gleichen Zeiten gemachten Schwingungszahlen.

Die Beobachtung der Oscillationen einer Inclinationsnadel kann nie sehr genaue Resultate geben, und deshalb sind die Schwingungsversuche mit horizontalen Nadeln oder Stäben vorzuziehen. Die Kraft, welche die Declinationsnadel oscilliren macht, ist nur ein Theil und zwar die horizontale Seitenkraft der ganzen, in der Richtung der Inclinationsnadel wirkenden magnetischen Erdkraft; wenn aber die horizontale Intensität und die Größe der Inclination bekannt ist, so kann man leicht die totale Intensität berechnen.

Auch durch Construction kann man die ganze Intensität finden, wenn die horizontale Intensität und die Inclination bekannt sind. In Fig. 364 sey *a b* die horizontale Intensität; macht man nun den Winkel *i* gleich der an demselben Orte beobachteten Inclination, setzt man ferner in *b* ein Perpendikel an, so stellt *ac* die ganze Inclination dar.

Fig. 364.



Wenn $i = o$, so fällt die Richtung der erdmagnetischen Kraft in eine horizontale Ebene; es ist dies bekanntlich auf dem magnetischen Aequator der Fall; hier ist die horizontale Intensität der ganzen Intensität gleich. Ueberhaupt wird der horizontale Antheil der magnetischen Erdkraft um so größer, je mehr man sich dem magnetischen Aequator nähert; an den magnetischen Polen der Erde, wo die Inclinationsnadel vertikal steht, ist der horizontale Antheil der magnetischen Erdkraft gleich Null.

Wenn man die Resultate der Intensitätsbestimmungen zusammenstellt, welche an verschiedenen Orten der Erdoberfläche gemacht worden sind, so ergiebt sich das allgemeine Resultat, daß die totale Intensität in der Nähe des magnetischen Aequators am kleinsten ist, und daß sie um so mehr wächst, je mehr man sich von demselben nach Norden oder Süden entfernt. In der Nähe der magnetischen Pole ist sie ungefähr 1,5mal so groß als am Aequator. An einem und demselben Orte ist aber die Intensität auch veränderlich und wie die Declination und Inclination täglichen Variationen unterworfen.

Einfluß des Erdmagnetismus auf das Eisen. Wenn man eine 164
Stange von weichem Eisen, welche 6 bis 10 Decimeter lang ist, in die Richtung der Inclinationsnadel hält, so wird sie durch den Einfluß des Erdmagnetismus selbst magnetisch, und zwar wird ihr unteres Ende ein Südpol, ihr oberes ein Nordpol, wie man leicht sehen kann, wenn man eine kleine empfindliche Magnetnadel bald dem oberen, bald dem unteren Ende der Stange nähert. Kehrt man den Stab um, so sind sogleich auch seine Pole umgekehrt, das untere Ende ist wieder ein Südpol, das obere wieder ein Nordpol.

Dieselbe Wirkung, nur etwas schwächer, bringt auch der Erdmagnetismus auf eine vertikal hängende Eisenstange hervor, überhaupt auf jede Eisenstange, welchen Winkel sie auch mit der Richtung der Inclinationsnadel macht; nur ist die Wirkung um so geringer, je mehr sie sich von der Richtung der Inclinations-

nadel entfernt. Denselben Einfluß äußert der Erdmagnetismus auch mehr oder weniger auf alle Eisenmassen; alles weiche Eisen muß also unter dem Einflusse des Erdmagnetismus einen polaren Magnetismus annehmen, der sich je nach den Umständen deutlicher oder weniger deutlich nachweisen läßt.

Wenn eine Stange von Eisen durch den vertheilenden Einfluß des Erdmagnetismus selbst zum Magneten gemacht ist, so reichen einige Schläge mit dem Hammer hin, um den Magnetismus zu fixiren und die Stange zu einem bleibenden Magneten zu machen; durch das Schlagen wird also dem Eisen eine Coërcitivkraft ertheilt, welche hindert, daß die durch den Einfluß der Erde im Eisen getrennten magnetischen Fluida sich wieder vereinigen. Dadurch erklärt sich auch, daß fast alle Werkzeuge in der Werkstatt eines Schlossers Magnete sind.

Es scheint, daß auch chemische Veränderungen ähnlich wirken wie mechanische Erschütterungen, um den durch die Erde vertheilten Magnetismus des Eisens zu fixiren; denn man findet, daß Eisenstangen, welche längere Zeit vertikal standen und in dieser Stellung rosteten, einen bleibenden Magnetismus erhalten haben.

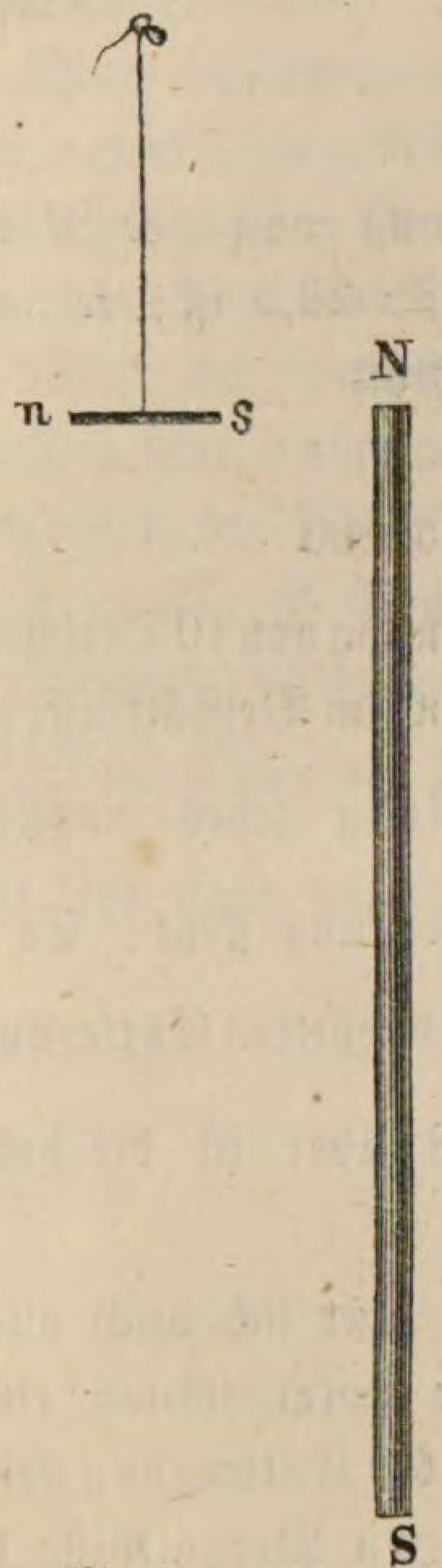
Wenn man einen Hufeisenmagneten in Eisenfeile taucht, so hängt sich zwischen den Polen ein Bündel derselben an; wenn man sie nun mit etwas Wasser befeuchtet und dann mittelst der Löthrohrflamme zum Glühen erhitzt, während sie noch immer dem vertheilenden Einflusse des Magneten ausgesetzt sind, so geht eine theilweise Oxydation des Eisens vor sich; man erhält eine ziemlich compacte Masse, deren Zusammensetzung der der natürlichen Magnete ähnlich ist und welche ebenfalls bleibenden Magnetismus zeigt.

165 **Abnahme der magnetischen Kraft in der Entfernung.** Nachdem wir die magnetische Wirkung der Erde kennen gelernt haben, können wir nun auch untersuchen, nach welchem Gesetze die Stärke der magnetischen Anziehungen und Abstoßungen mit wachsender Entfernung abnimmt. Es läßt sich wohl von vornherein vermuthen, daß die magnetischen Wirkungen, wie alle anderen von einem Punkte ausgehenden Wirkungen, im umgekehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung stehen, d. h. daß in 2-, 3-, 4mal größerer Entfernung die Wirkung 4mal, 9mal, 16mal kleiner ist.

Wenn man versuchen will, dies Gesetz durch das Experiment zu bestätigen, so stößt man auf die eigenthümliche Schwierigkeit, daß man nie mit einem magnetischen Pole allein experimentiren kann, daß der eine immer etwas auf die Wirkung des anderen influirt; man hat deshalb nur dafür zu sorgen, daß die Entfernung des einen Pols so groß ist, daß sein störender Einfluß gegen die Wirkungen des anderen verschwindet.

Eine kleine Magnetnadel wird an einem Coconfaden so aufgehängt, daß sie in horizontaler Ebene frei oscilliren kann, daß sie aber vor störenden Luftströmungen hinlänglich geschützt ist. Diese Nadel läßt man zuerst unter dem alleinigen Einflusse des Erdmagnetismus oscilliren.

Fig. 365.



Nun läßt man den einen Pol eines möglichst stark magnetisirten Stahlstabes auf die Nadel wirken. Dieser Stahlstab wird in den magnetischen Meridian der Nadel *ns* gebracht und zwar in vertikaler Stellung, so daß dem Pole *s* der Nadel derjenige Pol *N* des Stabes zugekehrt ist, auf welchen er anziehend wirkt.

Der Stab *NS* muß so groß seyn, daß die Entfernung *sN* möglichst klein ist im Vergleich zur Entfernung *sS*, daß man also die Wirkung des Pols *S* auf *s* ohne merklichen Fehler vernachlässigen kann.

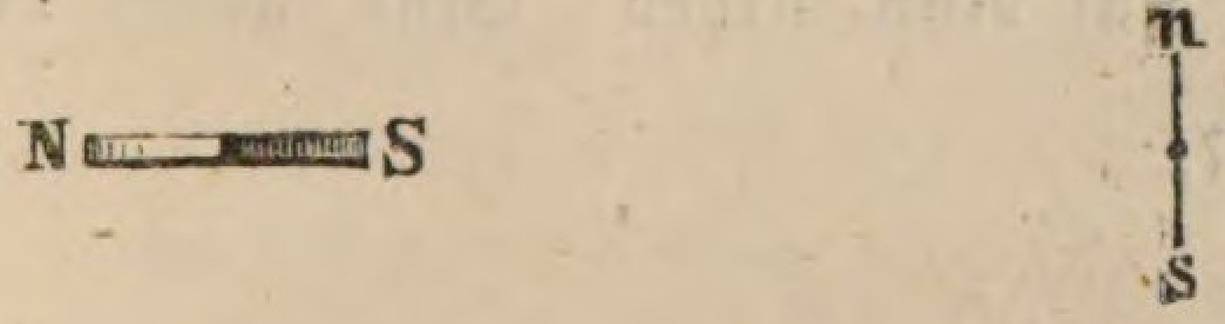
Unter dem Einflusse des Magnetpols *N* wird nun die Nadel *n s* rascher oscilliren als unter dem alleinigen Einfluß des Erdmagnetismus, und zwar um so schneller, je näher *N* bei *s* steht.

Hat man die Schwingungszahl der Nadel für die einfache, doppelte, dreifache Entfernung zwischen *N* und *s* und für den Fall beobachtet, daß der Magnetstab *NS* ganz entfernt ist, so ergiebt sich aus diesen Zahlen, daß die anziehende Kraft des Pols *N* auf *s* in der doppelten und dreifachen Entfernung 4mal, 9mal geringer ist.

Weber hat diesen Satz auf indirectem Wege bewiesen, indem er nicht die Wirkung eines einzelnen Pols, sondern die Wirkung des ganzen Magneten in größerer Entfernung untersuchte. Er hat gezeigt, daß, wenn ein Magnetstab klein ist im Vergleiche mit der Entfernung, auf welche er wirkt, daß alsdann die Totalwirkung eines Magneten im umgekehrten Verhältnisse der dritten Potenz der Entfernung abnehmen muß, wenn die Wirkung eines einzelnen Pols wirklich im umgekehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung steht.

In Fig. 366 sey *NS* ein Magnetstab von 1 Decimeter Länge, dessen Mitte 10 Decimeter weit vom Mittelpunkte der kleinen Magnetnadel *n s* entfernt ist. Die Magnetnadel sey so klein, daß die Länge *Ss* nicht merklich größer ist, als die Entfernung von *S* bis zur Mitte der Nadel, so ist $Ss = 9{,}5$ Decimeter und *Ns* ist 10,5 Decimeter. Bezeichnet man mit 1 die Kraft, mit welcher sich die Pole *S* und *s* in der Entfernung von 1 Decimeter abstoßen, so ist jetzt die abstoßende Kraft $\frac{1}{9{,}5^2} = \frac{1}{90{,}25}$, wenn die Wirkung des Pols im umgekehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung steht. Aus derselben Voraussetzung ergiebt sich für die anziehende Wirkung zwischen den Polen *N* und *s* der Werth $\frac{1}{10{,}5^2} = \frac{1}{110{,}25}$; die

Fig. 366.



Totalwirkung, welche der Magnet NS auf s ausübt, ist also $\frac{1}{90,25} - \frac{1}{110,25} = \frac{20}{9950}$.

Bringt man den Magneten in die doppelte Entfernung von der Nadel, d. h. legt man ihn mithin so, daß $Ss = 19,5$ und $Ns = 20,5$ ist, so muß nun die Totalwirkung des Magneten NS auf den Pol s seyn

$$\frac{1}{19,5^2} - \frac{1}{20,5^2} = \frac{1}{380,25} - \frac{1}{420,25} = \frac{40}{159800}.$$

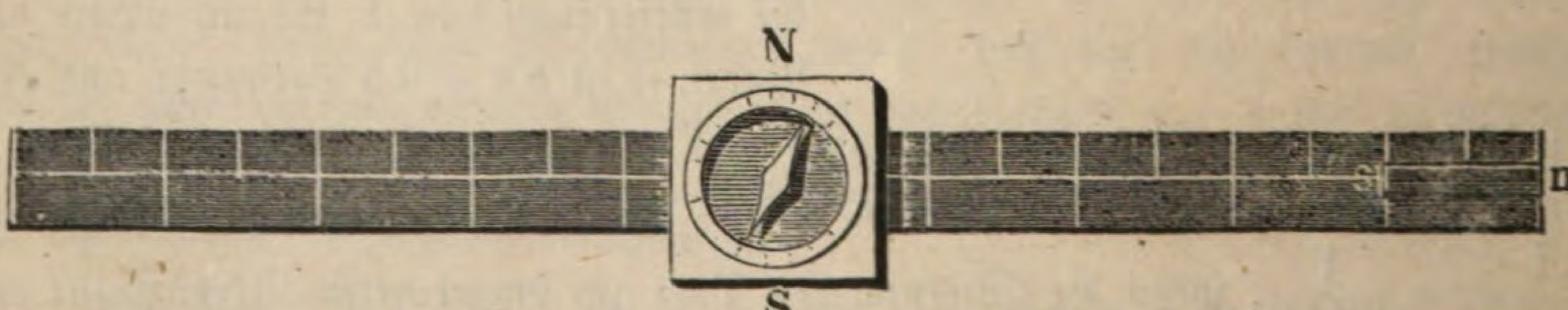
Wenn man also die Mitte des Magnetstabes aus der Entfernung von 10 Decimeter in die Entfernung von 20 Decimeter bringt, so muß seine Wirkung im Verhältnisse von $\frac{20}{9950}$ zu $\frac{40}{159800}$ abnehmen, vorausgesetzt, daß die Wirkung jedes einzelnen Pols im umgekehrten Verhältnisse des Quadrats die Entfernung steht. Es ist aber $\frac{20}{9950} : \frac{40}{159800} = \frac{1}{995} : \frac{2}{15980} = \frac{15980}{1990} = 8$; in der doppelten Entfernung ist also die Totalwirkung des Magneten 8mal schwächer, 8 aber ist die dritte Potenz gegen 2.

Was hier an einem speciellen Beispiele gezeigt wurde, läßt sich auch allgemein beweisen, es läßt sich allgemein darthun, daß die Totalwirkung eines Magneten im umgekehrten Verhältnisse der dritten Potenz der Entfernung stehen muß, wenn die Wirkung der einzelnen Pole im umgekehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung steht, vorausgesetzt, daß die Dimensionen des Stabes und der Nadel klein genug sind im Vergleich zu ihrer gegenseitigen Entfernung.

Daß sich aber die Totalwirkung eines Magnetstabes in der Ferne wirklich umgekehrt verhält wie die dritte Potenz der Entfernung, läßt sich durch den Versuch in folgender Weise bestätigen.

Ein Stab, welcher 1 Meter lang und in halbe Decimeter getheilt ist, werde so gelegt, daß seine Richtung rechtwinklig auf der des magnetischen Meridians steht. Auf seine Mitte werde dann eine kleine Bussole gesetzt, wie man Fig. 367 sieht. Die Nadel dieser Bussole wird auf Null stehen wenn außer der

Fig. 367.



magnetischen Erdkraft keine anderen magnetischen Kräfte auf sie wirken. Wenn man aber seitwärts auf den Stab einen Magneten legt, so wird die Nadel ab-

gelenkt, und zwar ist die ablenkende Kraft der Tangente des Ablenkungswinkels proportional.

Man lege nun einen Magnetstab von 1 Decimeter Länge so wie es die Fig. 367 zeigt, daß also seine Mitte 45 Centimeter weit von der Mitte der Bussole entfernt ist. Bei einem solchen Versuche ergab sich eine Ablenkung von $11\frac{1}{2}^0$.

Nun wurde der Magnetstab *ns* so gelegt, daß seine Mitte 30 Centimeter weit von der Mitte der Bussole war, und nun betrug die Ablenkung $35\frac{1}{4}^0$.

Die Entfernungen verhalten sich hier wie 30 zu 45 oder wie 2 zu 3, die Tangenten der Ablenkungswinkel müssen sich also verhalten wie 2^3 zu 3^3 oder wie 8 zu 27; es ist aber $\frac{27}{8} = 3,375$.

Nun aber ist auch $tang.\,11\frac{1}{2}^0 = 0{,}2034$, $tang.\,35\frac{1}{4}^0 = 0{,}7115$, und es ist $\frac{0{,}7115}{0{,}2034} = 3{,}49$; die Tangenten der Ablenkungswinkel verhalten sich also in der That sehr nahe wie 8 zu 27 oder wie die dritten Potenzen der Entfernungen.

Zweite Abtheilung.

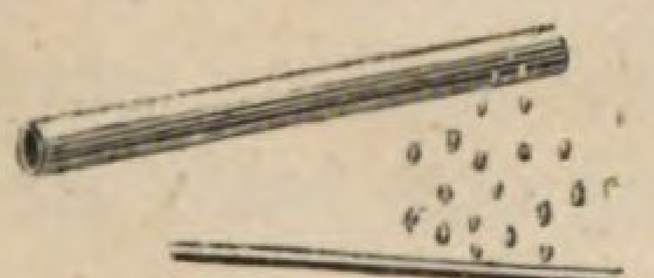
Von der Elektricität.

Erstes Kapitel.

Von den elektrischen Wirkungen.

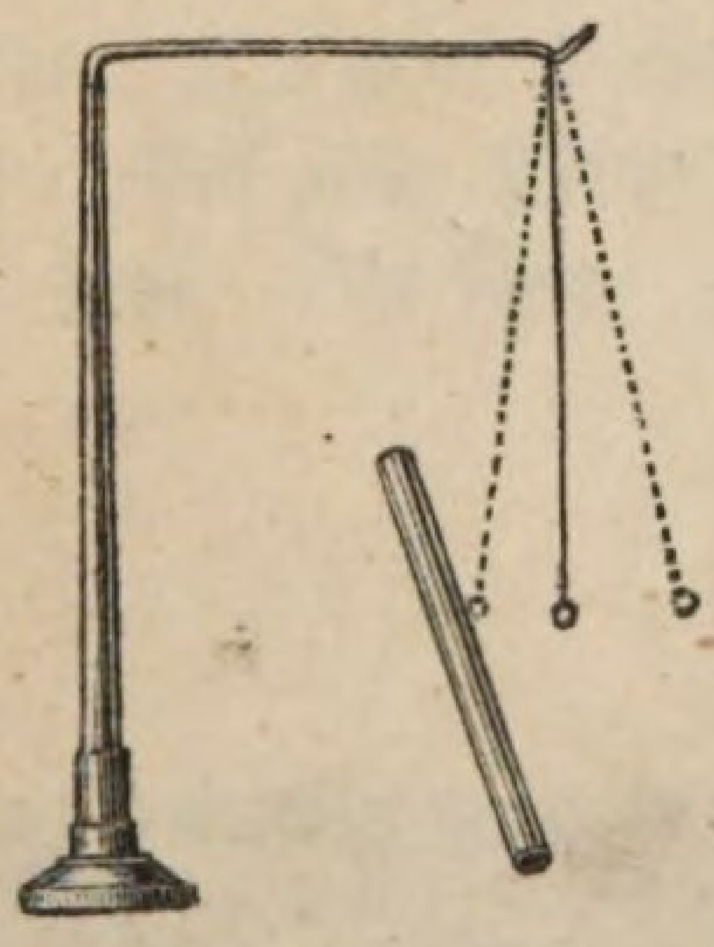
166 **Es giebt Körper, welche durch Reiben die Eigenschaft erlangen, leichte Körper anzuziehen.** Man kann sich leicht überzeugen, daß die Körper in ihrem gewöhnlichen Zustande durchaus die Eigenschaft nicht haben, leichte Gegenstände, wie Goldflitter, Sägespäne, Papierschnitzel, Kügelchen von Hollundermark u. s. w., anzuziehen. Wenn man aber mit Wollen- oder Seidenzeug einen Glasstab, eine Stange Schwefel oder Siegellack, ein Stück Bernstein, Gutta-Percha u. s. w. reibt, so erlangen diese Körper sogleich jene merkwürdige Eigenschaft. (Fig. 368). Die Ursache dieses Phänomens nennt man Elektricität.

Fig. 368.



Um zu untersuchen, ob ein Körper durch Reiben elektrisch wird oder nicht, kann man das elektrische Pendel anwenden (Fig. 369). Es besteht aus einer kleinen Kugel von Hollundermark, welche an einem feinen Leinenfaden aufgehängt ist. Wenn man einen Körper prüfen will, so nähert man ihn dem Kügelchen; wird es angezogen, so ist der Körper elektrisch, wird es aber nicht angezogen, so ist er entweder nicht elektrisch, oder seine Elektricität ist doch zu schwach, um hier eine Wirkung hervorzubringen.

Fig. 369.



Mit Hülfe des elektrischen Pendels läßt sich zeigen, daß alle Harze, Bernstein, Schwefel, Glas durch Reiben stark elektrisch werden; Edelsteine, Holz, Kohle geben selten Spuren von Anziehung; Metalle endlich scheinen auf den ersten Anblick durch Reiben gar nicht elektrisch gemacht werden zu können, denn man mag einen Metallstab, den man in den Händen hält, noch so stark reiben, man erhält an diesem Apparate auch nicht die mindesten Spuren von Anziehung.

Man zerfällte danach alle Körper in zwei große Klassen: in solche, welche durch Reiben elektrisch werden, und solche, welche diese Eigenschaft nicht haben. Erstere nannte man idioelektrische, letztere anelektrische Körper.

Diese Eintheilung beruht jedoch auf einer irrigen Ansicht; denn man hat gefunden, daß alle Körper, selbst Metalle, durch Reiben elektrisch gemacht werden können, und wenn man bei vielen durch Reiben keine Spur von Elektricität erhalten kann, so liegt die Ursache davon in anderen Umständen, die wir bald näher werden kennen lernen.

Leiter und Nichtleiter. Ein englischer Physiker, Gray, fand im 167
Jahre 1727, daß auch Metalle den elektrischen Zustand annehmen können, und zwar auf folgende Weise. Das eine Ende einer offenen Glasröhre war mit einem Kork verstopft und in diesem steckte ein Metallstäbchen; wurde nun die Röhre gerieben, so zeigte sich alsbald auch das Metallstäbchen elektrisch: ein Beweis, daß es die Elektricität aufzunehmen und fortzupflanzen vermag. Dieselbe Eigenschaft haben aber alle anelektrischen Körper, man nannte sie deshalb Leiter der Elektricität. Die idioelektrischen Körper dagegen sind keine Leiter; denn wenn man z. B. einen Glasstab durch Reiben an einem Ende elektrisch macht, so zeigt das andere Ende keine Anziehung.

Man kann diese Fundamentalwahrheit sehr gut mit Hülfe der Elektrisirmaschine nachweisen, welche wir, ohne noch ihre Einrichtung zu kennen, doch vor der Hand schon als Mittel anwenden können, um Elektricität zu entwickeln. Der Conductor der Maschine ist ein metallischer Körper, welcher elektrisch gemacht wird. Wenn man mit dem in den elektrischen Zustand versetzten Conductor einen langen an Seidenschnüren aufgehängten Metalldraht, oder bequemer einen cylindrischen Metallkörper, der auf einem Glasfuße steht, in Verbindung bringt, so wird das Metall seiner ganzen Ausdehnung nach elektrisch; sobald man es aber durch irgend einen guten Leiter mit dem Boden in Verbindung setzt, verschwindet alle Elektricität augenblicklich.

Es geht daraus auch hervor, daß die Seidenfäden, der Glasstab, Nichtleiter der Elektricität, daß sie Isolatoren sind. Ein Leiter der Elektricität kann also nur so lange elektrisch bleiben, als er isolirt, d. h. von lauter Nichtleitern umgeben ist. Auch die Luft ist ein Isolator, denn sonst würde die Elektricität von dem Metalle augenblicklich durch die Luft abgeführt werden.

Wasser und Wasserdampf sind gute Leiter, deshalb verliert sich die Elektricität, welche auf einem isolirten Leiter bei trockener Luft lange haftet, sehr schnell, wenn die Luft feucht ist.

Auch der menschliche Körper ist ein guter Leiter. Wenn man, auf dem Boden stehend, den Conductor der Elektrisirmaschine anfaßt, so wird alle Elektricität, welche durch das Drehen derselben erzeugt wird, sogleich abgeführt; wenn man aber auf einem schlechten Leiter, etwa auf einem Harzkuchen, steht, so wird der ganze Körper elektrisch. Man sieht jetzt auch ein, warum eine Metallstange, die man in der Hand hält, durch Reiben nicht elektrisch wird; alle

Elektricität nämlich, welche man durch das Reiben auf dem Metall erzeugt, wird sogleich durch den menschlichen Körper wieder abgeführt.

Die besten Isolatoren werden Leiter, wenn sich Wasserdampf auf ihnen niederschlägt. Es ist deshalb für den Erfolg elektrischer Versuche von der größten Wichtigkeit, Glasfüße, Harzstangen u. s. w., welche einen Leiter isoliren sollen, durch Erwärmen und Reiben gehörig trocken zu machen.

Statt die Körper in Leiter und Nichtleiter einzutheilen, müßte man sie, um genauer zu reden, gute oder schlechte Leiter nennen, denn absolute Nichtleiter giebt es nicht. Schellack, überhaupt Harze, Seide und Glas sind die schlechtesten Leiter, die es giebt; die Metalle hingegen sind die besten Leiter.

168 **Von den beiden Arten der Elektricität.** Nehmen wir ein einfaches elektrisches Pendel (Fig. 370) zur Hand, dessen Kügelchen an einem Seidenfaden aufgehängt ist. Wenn man eine geriebene Glas- oder Schellackstange nähert, so wird das Hollundermarkkügelchen stark angezogen, es berührt die Stange, bleibt aber nur einige Augenblicke daran haften, um alsbald **abgestoßen** zu werden. Diese Repulsion rührt von der Elektricität her, welche dem Kügelchen durch die Berührung mit der Stange mitgetheilt worden ist; denn wenn man es mit der Hand berührt und es dadurch wieder auf seinen natürlichen Zustand zurückführt, wird es von Neuem angezogen und nach der Berührung abermals abgestoßen. Daß das abgestoßene Kügelchen wirklich elektrisch ist, geht auch daraus hervor, daß es selbst von Körpern, die sich im natürlichen Zustande befinden (man muß jedoch zu diesem Versuche Leiter wählen), angezogen wird.

Fig. 370.

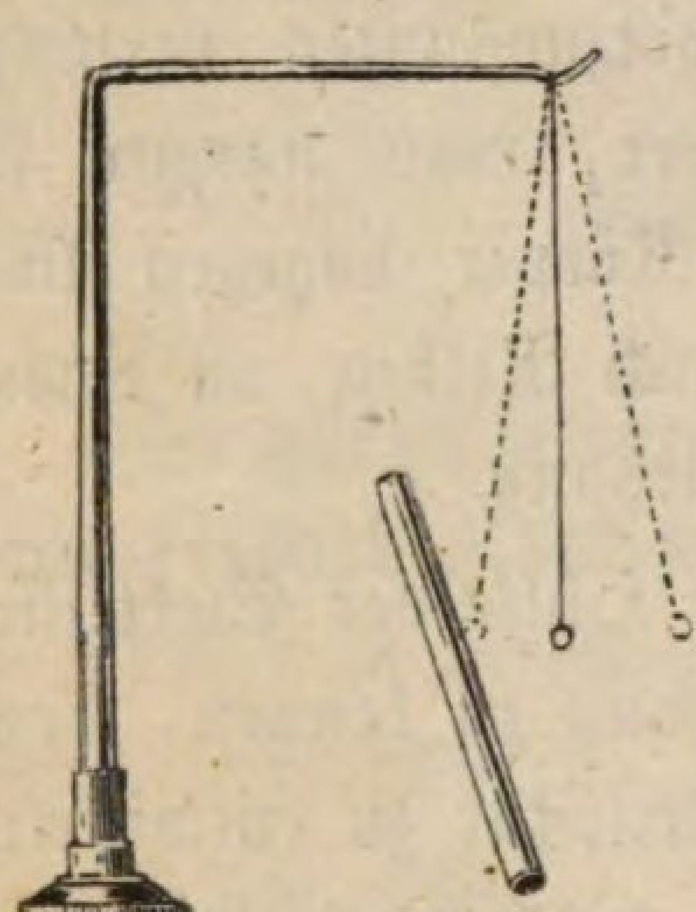
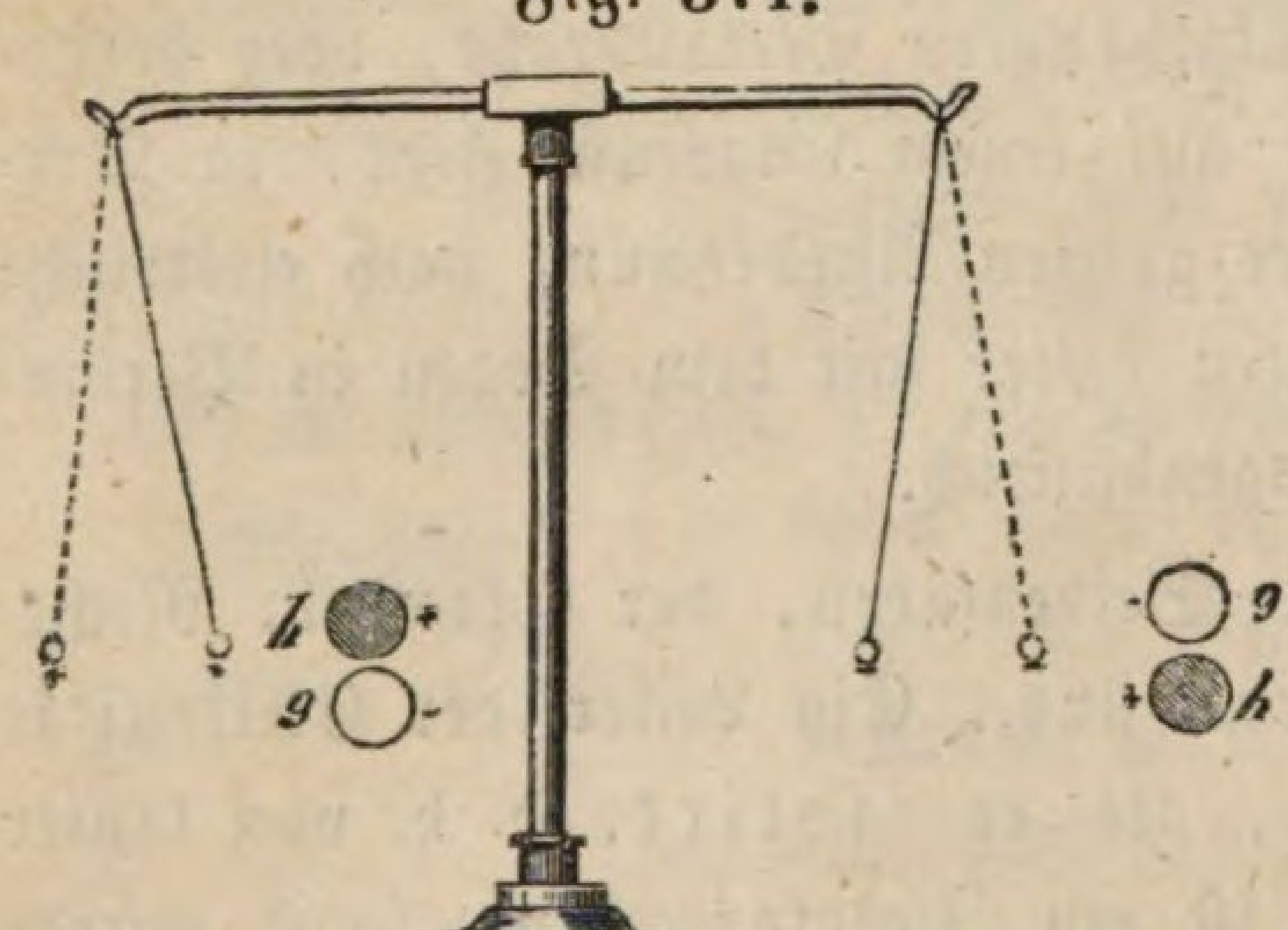


Fig. 371.



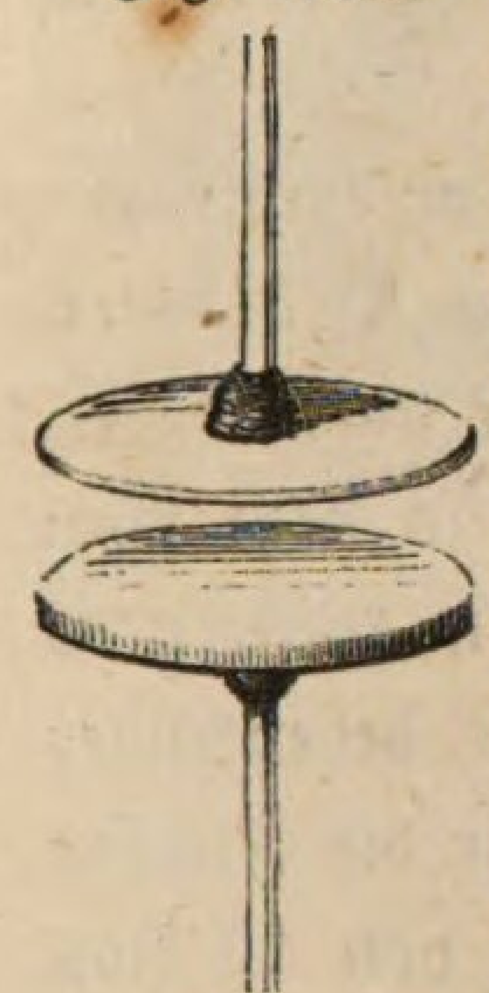
Wenn man zwei isolirte Pendel nimmt, von denen das eine durch Berührung mit einer Glasstange, die mit Seide gerieben worden war, das andere durch eine mit Pelz geriebene Schellackstange elektrisch gemacht worden ist, so beobachtet man folgende merkwürdige Erscheinung. Das eine Kügelchen, welches durch die Glasstange abgestoßen wird, wird durch die Schellackstange angezogen, das vom Schellack abgestoßene aber wird durch das Glas angezogen. Die Elektricität des geriebenen Glases ist also nicht identisch mit der des Harzes, weil jede das anzieht, was die andere abstößt.

Die beiden Elektricitäten hat man mit dem Namen der **Glaselektricität** und der **Harzelektricität** bezeichnet. Die Glaselektricität wird auch die **positive**, die Harzelektricität die **negative** genannt. Die Entdeckung der beiden verschiedenen Elektricitäten wurde von **Dufay** im Jahre 1773 gemacht.

Von den elektrischen Flüssigkeiten und dem natürlichen Zustande der Körper. Was eigentlich das Agens sey, welches die elektrischen Erscheinungen hervorbringt, ist bis jetzt noch ganz und gar unbekannt; da es jedoch sehr schwer hält, eine klare Uebersicht der elektrischen Erscheinungen zu geben, ohne eine theoretische Ansicht über das Wesen der Elektricität zu Grunde zu legen, so behält man die Vorstellung von elektrischen Flüssigkeiten noch bei, obgleich die Existenz solcher Flüssigkeiten höchst unwahrscheinlich ist. — Man nimmt zwei elektrische Flüssigkeiten an. Wenn diese beiden Flüssigkeiten in einem Körper verbunden sind, wenn sie sich in demselben gegenseitig neutralisiren, so ist er in seinem natürlichen Zustande. Wenn in einem Körper aber die beiden *E* zersetzt werden, so wird er elektrisch, und zwar positiv, wenn die Glaselektricität, negativ, wenn die Harzelektricität vorherrscht. Zwischen den elektrischen und magnetischen Flüssigkeiten findet jedoch ein wesentlicher Unterschied Statt; diese sind in den magnetischen Partikeln gleichsam eingeschlossen, sie können aus denselben nicht heraustreten, während die elektrischen Fluida frei von einem Körper zum anderen übergehen können. 169

Wenn durch Reiben in einem Körper $+ E$ frei gemacht wird, so muß in gleichem Maaße auch $- E$ entwickelt werden. Man kann dies durch einen einfachen Versuch nachweisen. Wenn man irgend zwei Scheiben von verschiedenen Substanzen, deren jede durch einen Glasstab isolirt ist, an einander reibt, so zeigen sie, so lange sie auf einander liegen, keine Spur von Elektricität; sobald man sie aber trennt, ist die eine positiv, die andere eben so stark negativ elektrisch. Besonders geeignet für diesen Versuch ist es, wenn die eine Scheibe von Glas, die andere aber etwa von Holz und mit einer Lederscheibe überzogen ist, die man mit etwas Amalgam bestrichen hat. Man kann aber auch Scheiben von jeder anderen Substanz, Harz, Metall u. s. w. nehmen, und um die Versuche mehr abzuändern, dieselben mit verschiedenen Stoffen, Tuch, Seide, Papier u. s. w. überziehen.

Fig. 372.



Da ein Körper in seinem natürlichen Zustande die beiden *E* in gleichem Maaße enthält, so giebt es keinen Grund, anzunehmen, daß er besonders geeignet sey, vorzugsweise die eine aufzunehmen und zurückzuhalten; er kann also auch durch Reiben bald +, bald — elektrisch werden, je nachdem man ein anderes Reibzeug wählt. Glas z. B. wird, mit Wolle oder Seide gerieben, positiv, mit einem Katzenpelze gerieben, negativ elektrisch. Um die Elektricitätsart genau zu bezeichnen, muß man also sagen: die $+ E$ ist diejenige, welche das Glas durch Reiben mit Wolle oder Seide annimmt, die $- E$ hingegen diejenige, welche das Harz annimmt, wenn man es mit einem Katzenfelle oder mit Wolle reibt.

Nehmen wir an, man habe eine Liste verschiedener Körper in der Weise aufgestellt, daß jeder vorangehende, mit allen folgenden gerieben, + elektrisch wird, so wird man bald bemerken, daß die geringste Veränderung der Umstände diese Reihenfolge ändert. Eine Veränderung der Temperatur z. B. kann

machen, daß ein Körper in dieser Reihe mehr hinauf oder herunter zu rücken ist. Dieselbe Wirkung hat es oft, wenn man einen Körper mehr polirt oder seine Oberfläche rauher macht. Die Farbe, die Anordnung der Moleküle, selbst ein mehr oder weniger starker Druck kann ähnliche Erscheinungen hervorbringen. Ein schwarzes seidenes Band z. B. wird, mit einem weißen seidenen Bande gerieben, immer negativ elektrisch.

170 **Mittheilung der Elektricität.** Die freie Elektricität kann sowohl bei unmittelbarer Berührung, als auch auf größere Entfernungen hin von einem Körper zum anderen übergehen; immer hängt aber die Mittheilung von der Leitfähigkeit der Körper und der Größe ihrer Oberfläche ab.

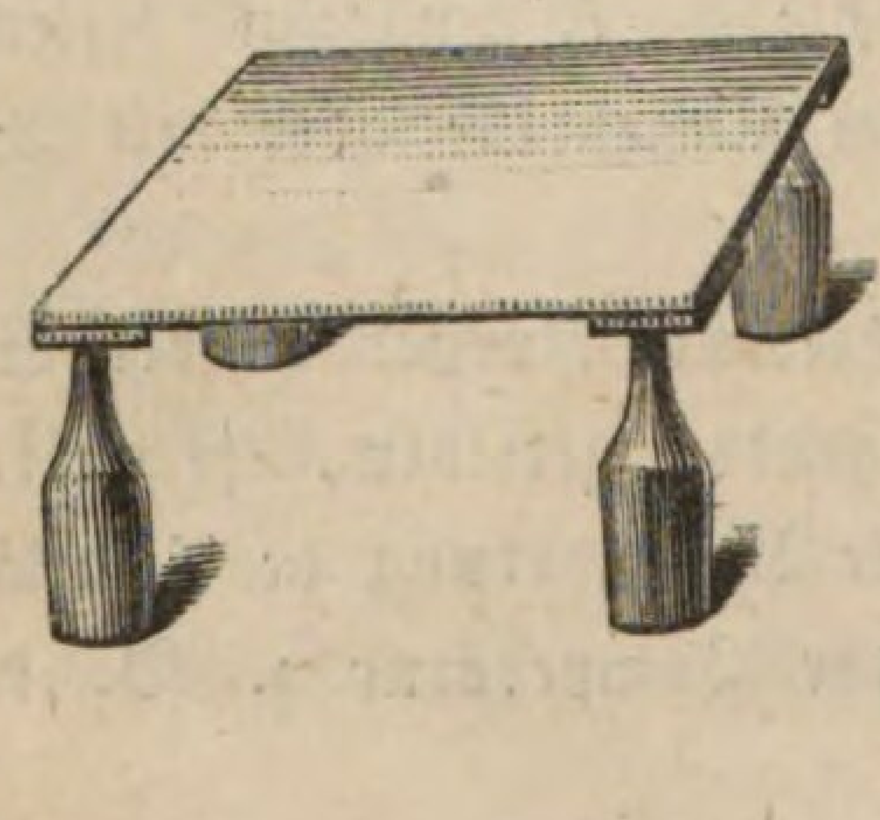
Bei der Berührung mit einem elektrisirten Körper nehmen schlechte Leiter die Elektricität nur unmittelbar an der berührenden Stelle auf, sie verbreitet sich nicht über ihre ganze Ausdehnung. Wenn man umgekehrt einen elektrisirten Isolator an einer Stelle berührt, so verliert er nur unmittelbar hier etwas Elektricität, die ganze nicht berührte Oberfläche bleibt nach wie vor elektrisch. Es läßt sich dies sehr leicht mit einer geriebenen Glas- oder Siegellackstange zeigen. Bei guten Leitern verhält sich die Sache ganz anders. An einem Punkte mit einem elektrischen Körper berührt, verbreitet sich die übergegangene Elektricität über den ganzen Leiter, und wenn man einen isolirten elektrisirten Leiter mit dem Boden in leitende Verbindung bringt, so verliert er augenblicklich alle seine Elektricität.

Auch ohne unmittelbare Berührung kann die Elektricität von einem Körper zum anderen übergehen, und man beobachtet dabei das merkwürdige Phänomen des elektrischen Funkens. Wenn man einem geriebenen Glas- oder Schellackstabe einen Metallstab oder den Knöchel eines Fingers nähert, so sieht man einen lebhaft glänzenden Funken überspringen und hört dabei ein knisterndes Geräusch. Wenn der elektrisirte Körper ein isolirtes Metall von bedeutender Oberfläche ist, wie der Conductor der Elektrisirmaschine, so werden die Funken stärker, sie springen unter Umständen schon in einer Entfernung von 12 Zoll über; ihr Licht ist dann blendend hell, und das Geräusch, welches sie begleitet, sehr stark.

Otto von Guericke, der Erfinder der Luftpumpe, hat zuerst den elektrischen Funken beobachtet. Später zeigte Dufay zur allgemeinen Verwunderung, daß man selbst aus dem menschlichen Körper, wie aus dem Conductor der Maschine, Funken entlocken könne.

Um den Versuch zu machen, stellt man sich auf einen Harzkuchen, oder auf einen mit Glasfüßen versehenen Schemel (Isolirschemel) (Fig. 373) und bringt den Körper mit dem Conductor der Maschine in leitende Verbindung. Wenn die Maschine gedreht wird, gewahrt man auf der Haut, namentlich im Gesichte, ein eigenthümliches Gefühl, ungefähr wie wenn man in Spinnengewebe gerathen wäre. Die Haare auf dem

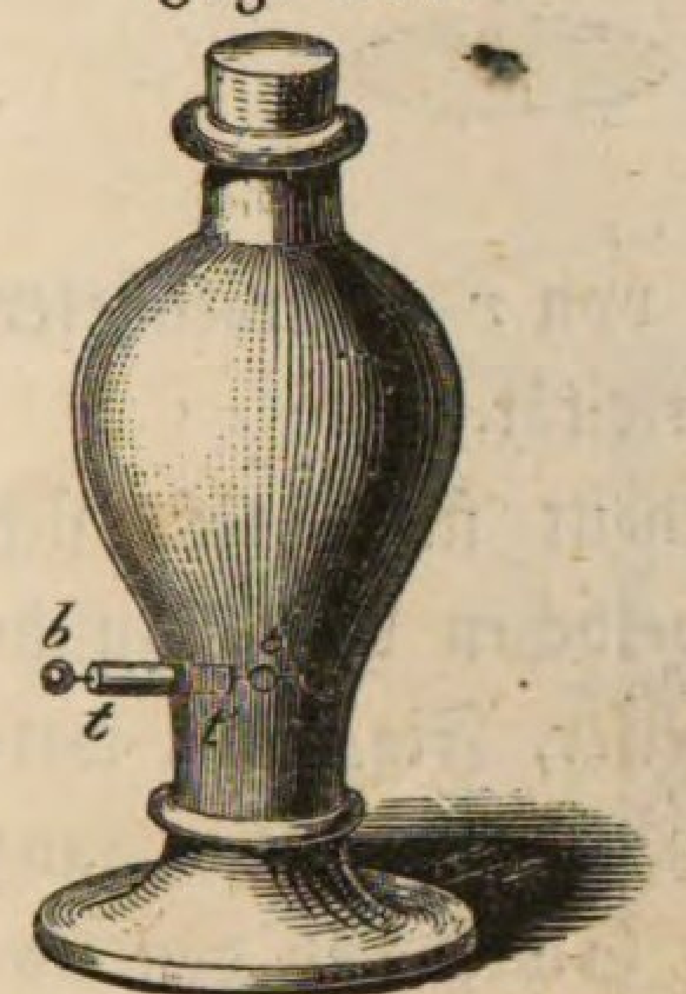
Fig. 373.



Kopfe sträuben sich. Wenn sich dem so elektrisirten menschlichen Körper ein nichtisolirter Leiter, etwa eine andere Person, mit dem Knöchel der Hand nähert, so springt ein Funken über, der für das Gefühl um so empfindlicher ist, auf je größere Entfernung er überspringt.

Wenn die Elektricität von einem isolirten Leiter auf einen anderen übergeht, so vertheilt sie sich stets nach dem Verhältnisse der Oberflächen; damit also ein isolirter Leiter alle seine Elektricität verliere, muß man ihn mit einem anderen in Berührung bringen, dessen Oberfläche unverhältnißmäßig größer ist, also z. B. mit dem Fußboden; denn dadurch ist er mit der ganzen Erdoberfläche in Verbindung, auf welcher sich seine Elektricität spurlos verliert, eben weil sie sich über eine so ungeheure Fläche gleichmäßig vertheilt. Wenn man eine isolirte elektrisirte Metallkugel mit einer anderen gleich großen, gleichfalls isolirten, aber nicht elektrischen in Berührung bringt, so wird erstere gerade die Hälfte ihrer *E* verlieren. Wenn man dem Conductor der Elektrisirmaschine eine isolirte Metallkugel nähert, so schlagen nur schwache Funken über während man mit einem nicht isolirten Leiter dem Conductor sehr kräftige Funken entlocken kann.

Fig. 374.



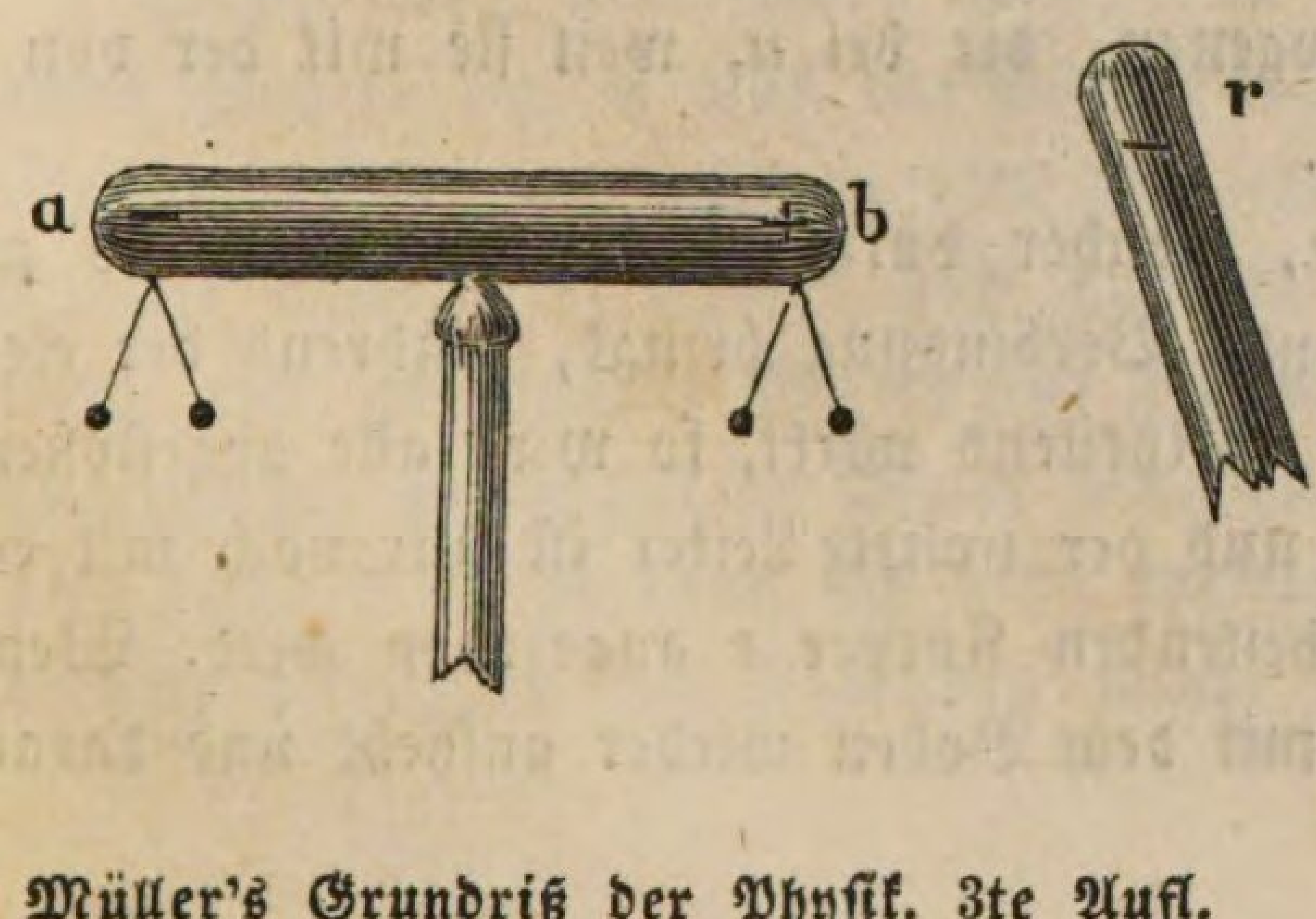
Eine eben ausgelöschte Kerze kann durch den elektrischen Funken wieder angezündet werden. Der schwächste elektrische Funken genügt schon, um Knallgas, ein Gemenge von Wasserstoff- und Sauerstoffgas, zu entzünden (die elektrische Pistole, Fig. 374; das Eudiometer). Stärkere Funken sind zur Entzündung von Aether, von Weingeist u. s. w. erforderlich.

Zweites Kapitel.

Elektricität durch Vertheilung.

Wir haben gesehen, daß jede der elektrischen Flüssigkeiten die gleichnamige 171
abstößt und die ungleichnamige anzieht. Diese Anziehung und Abstoßung äußert sich aber nicht allein auf die schon zersetzten Flüssigkeiten, sondern auch auf die noch verbundenen, und daher kommt es, daß die verbundenen Elektricitäten eines Körpers, der sich im natürlichen Zustande befindet, durch die Annäherung eines elektrischen Körpers vertheilt werden.

Fig. 375.



Einem isolirten Leiter *a b*, Fig. 375, nähere man von der

einen Seite her einen elektrischen Körper, etwa einen negativ elektrischen Harzstab *r*, so wird *ab* durch Vertheilung elektrisch. Dem vertheilenden Körper *r*

Fig. 376.

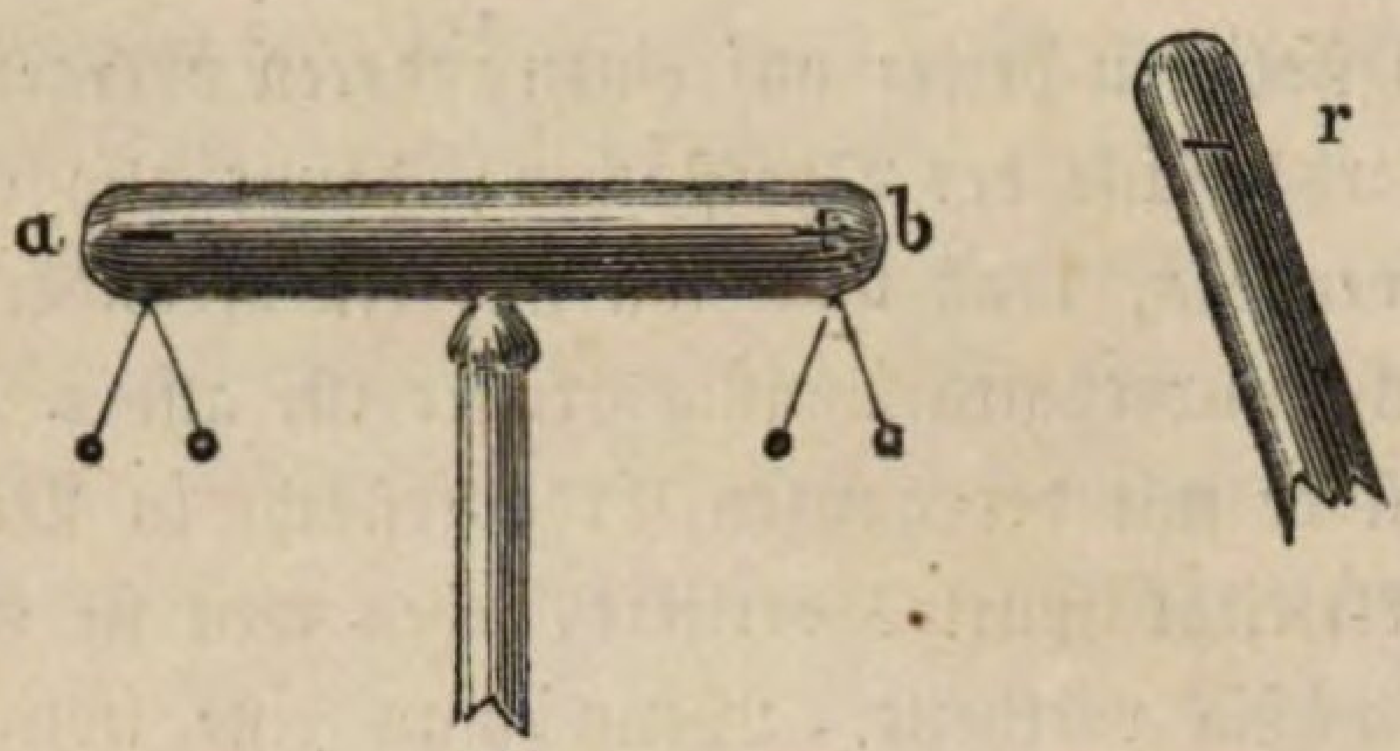
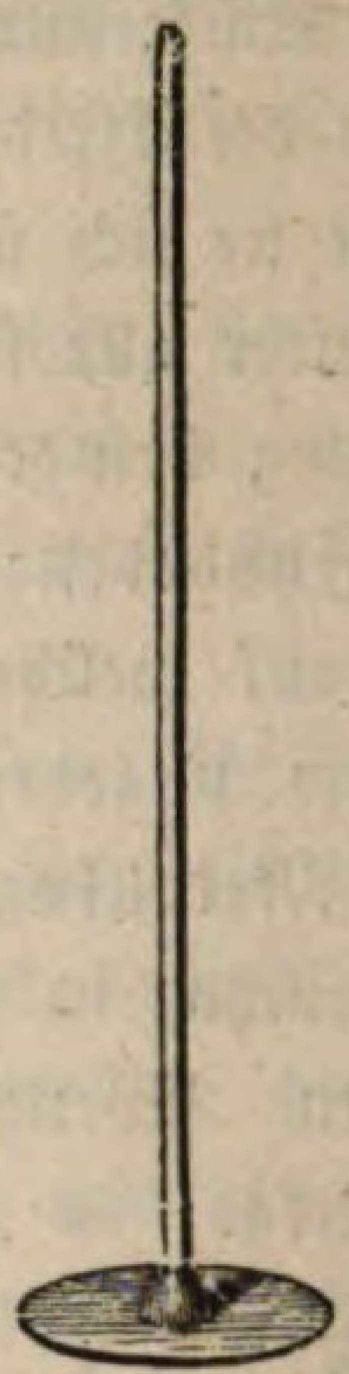


Fig. 377.



zunächst findet sich bei *b* die angezogene positive, an dem von *r* abgewendeten Ende *a* des isolirten Leiters die abgestoßene negative Elektricität.

Daß die Elektricitäten wirklich auf diese Weise vertheilt sind, läßt sich durch ein Probescheibchen nachweisen. Es ist dies ein Scheibchen von Rauschgold oder von Messingblech von 1 bis 2 Centimeter Durchmesser, Fig. 377, welches an einem langen Stäbchen von Schellack oder einem überfirnißten ganz dünnen Glasstäbchen befestigt ist. Berührt man mit diesem Scheibchen den isolirten Leiter bei *a*, während der negativ elektrische Körper *r* sich in der Nähe befindet, so wird sich das Probescheibchen mit der hier angehäuften Elektricität laden, und welche Elektricität dies sey, erfährt man, wenn man es einem einfachen elektrischen Pendel, etwa einem negativ elektrischen Collodiumballon, nähert. Derselbe wird in unserem Falle von dem Probescheibchen abgestoßen, weil es sich bei *a* mit — *E* geladen hat.

Um die bei *a* und *b* durch die vertheilende Wirkung des elektrischen Körpers *r* frei gewordene Elektricität auch ohne Probescheibchen nachzuweisen, brachte Biot an den Enden des isolirten Leiters elektrische Doppelpendel an (an leinenen Fäden hängende Hollundermarkkügelchen), welche augenblicklich divergiren, sobald man einen elektrischen Körper *r* nähert; die Pendel bei *b* divergiren, weil beide Kugeln mit der durch *r* angezogenen, die bei *a*, weil sie mit der von *r* abgestoßenen Elektricität geladen sind.

Wenn man einen isolirten Leiter, welcher durch Vertheilung elektrisch gemacht ist, mit dem Boden in leitende Verbindung bringt, während der elektrische Körper durch seine Nähe noch vertheilend wirkt, so wird alle abgestoßene Elektricität in den Boden abgeführt, und der isolirte Leiter ist nur noch mit der Elektricität geladen, welche vom vertheilenden Körper *r* angezogen wird. Wenn man alsdann die leitende Verbindung mit dem Boden wieder aufhebt und darauf

r entfernt, so ist nun der isolirte Leiter geladen, und zwar seiner ganzen Ausdehnung nach mit derselben Elektricität.

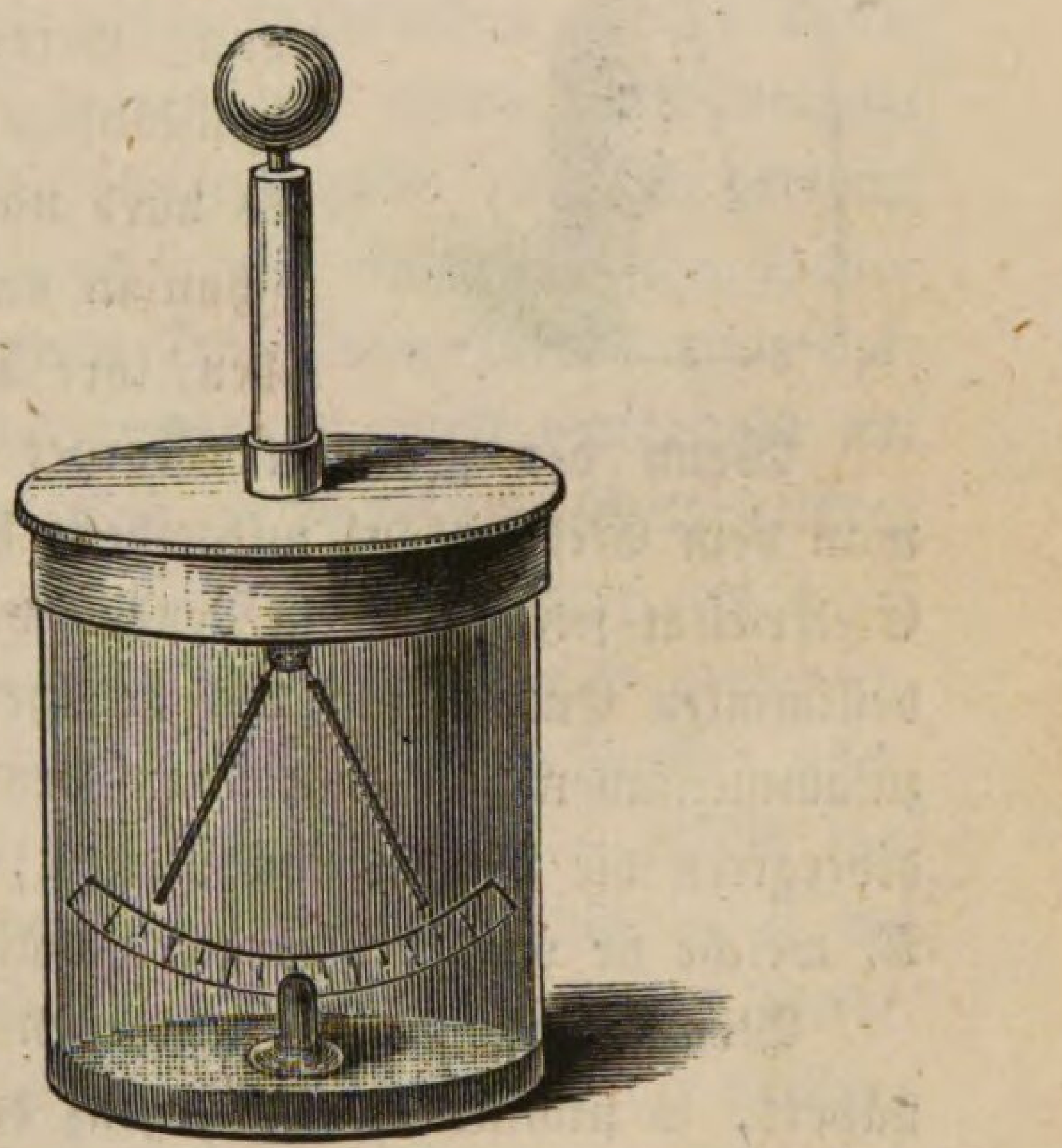
Das Princip der elektrischen Vertheilung liefert uns ein treffliches Elektroskop. — Wenn am unteren Ende eines isolirten Metallstabes ein Paar elektrische Pendel hängen, so divergiren sie, wenn man von oben einen elektrischen Körper nähert. Um aus einer solchen Vorrichtung ein brauchbares Elektroskop zu machen, müssen die Pendel zur Abhaltung von Luftströmungen in ein Glasgefäß eingeschlossen, und dann muß das leitende System sorgfältig isolirt seyn. Das Metallstäbchen steckt deshalb in einem gefirnißten Glasröhrchen. Die Pendel können aus Strohhalmen oder Metallblättchen u. s. w. bestehen.

Fig. 378 stellt ein Goldblattelektroskop dar. — Wird ein solches Instrument mit einem Gradbogen versehen, welcher gestattet, die Divergenz der Pendel zu messen, so erhält man ein **Elektrometer**. Fig. 379 stellt ein **Strohhalmelektrometer** dar.

Fig. 378.



Fig. 379.

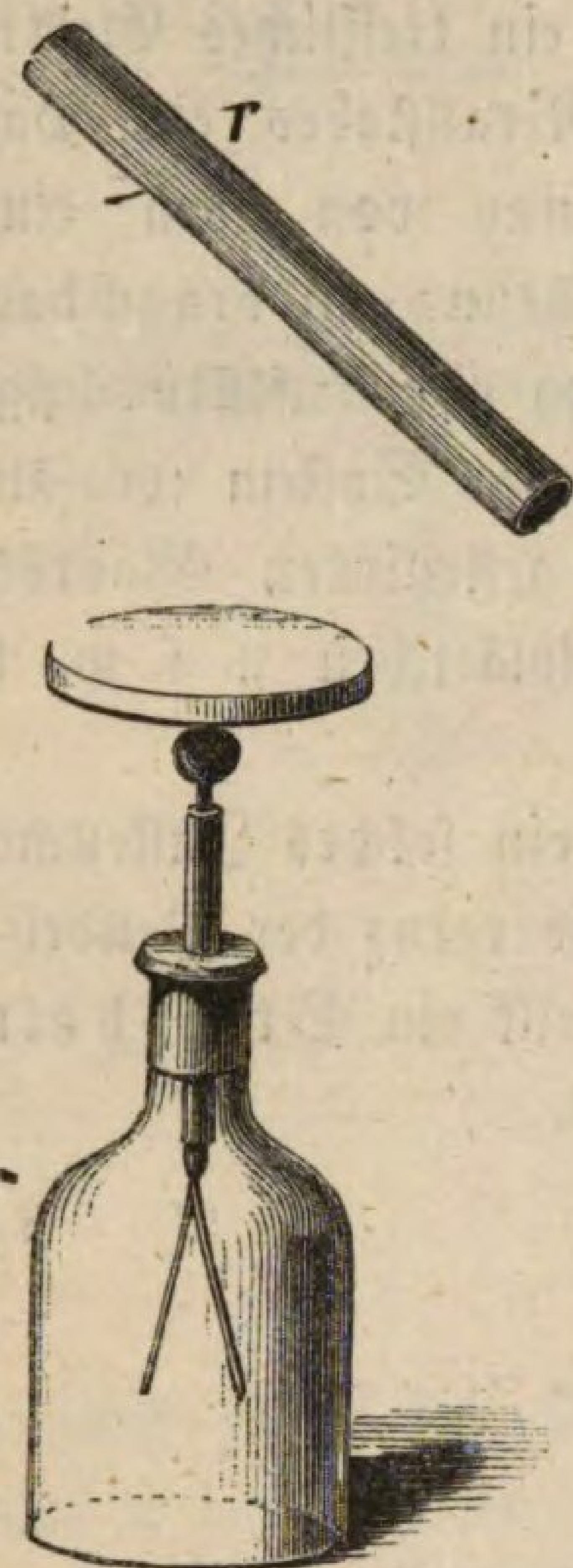


Wenn man einem Elektroskope von oben einen elektrischen Körper, etwa eine geriebene Glasstange, nähert, so divergiren die Pendel; die Natur der Elektricität, welche in der oben angeschraubten Metallplatte oder Kugel angesammelt ist, kann man durch Probescheibchen ermitteln, sie ist die entgegengesetzte von derjenigen des genäherten Körpers *r*. Fig. 380 (s. f. S.).

Wenn man untersuchen will, von welcher Natur die Elektricität irgend eines Körpers sey, so muß das Elektroskop schon im Voraus mit einer bekannten Elektricität geladen werden; dies geschieht, indem man einen Körper *r* von bekannter Elektricität nähert und die Platte mit dem Finger berührt. Dadurch wird alle abgestoßene Elektricität abgeleitet, und im Apparate bleibt nur die angezogene, welche auf der Platte angehäuft ist. Sie ist hier gewissermaßen **gebunden**, d. h. sie kann sich nicht entfernen, weil sie durch *r* angezogen wird; deshalb divergiren die Blättchen nicht; sobald man aber erst den Finger und

dann den Körper *r* entfernt, divergiren die Pendel, weil nun die Elektricität, welche durch den Körper *r* in die Platte gebunden worden war, sich frei über das ganze isolirte System, also auch über die Blättchen verbreitet. Die Elektricität, mit welcher auf diese Weise das Elektroskop geladen wird, ist natürlich die entgegengesetzte des Körpers *r*; wenn man also eine negative Ladung bezweckt, so kann man eine mit Seide geriebene Glasstange anwenden, indem diese positiv elektrisch ist.

Fig. 380.



Nähert man dem so geladenen Elektroskop einen elektrischen Körper, so wird dadurch die Divergenz der Pendel entweder vergrößert oder verkleinert werden. Sie wird vergrößert, wenn die *E* des zu untersuchenden Körpers mit derjenigen gleichnamig ist, welche man dem Apparate mitgetheilt hatte; denn durch seine Annäherung werden die Elektricitäten des Elektroskops noch vollständiger zersetzt, als es schon vorher der Fall war, es wird noch mehr von der Elektricität, von welcher schon in den Pendeln war, in dieselben hinuntergetrieben, ihre Divergenz muß also zunehmen.

Wenn der genäherte Körper mit derjenigen *E* ungleichnamig ist, welche man dem Elektroskope mitgetheilt hatte, so nimmt die Divergenz ab, weil die Elektricität jetzt aus dem Pendel weg und in die Platte gezogen wird. Bei einer bestimmten Entfernung des genäherten Körpers werden die Pendel vollständig zusammenfallen. Wenn man den zu prüfenden Körper noch mehr nähert, so divergiren die Pendel von Neuem, aber nun mit der entgegengesetzten von der *E*, welche sie vorher divergiren machte.

Wenn man einem geladenen Elektroskope einen nicht elektrischen Leiter nähert, so nimmt die Divergenz der Pendel ebenfalls ab. Es ergiebt sich dies leicht als nothwendige Folge der Gesetze der elektrischen Vertheilung.

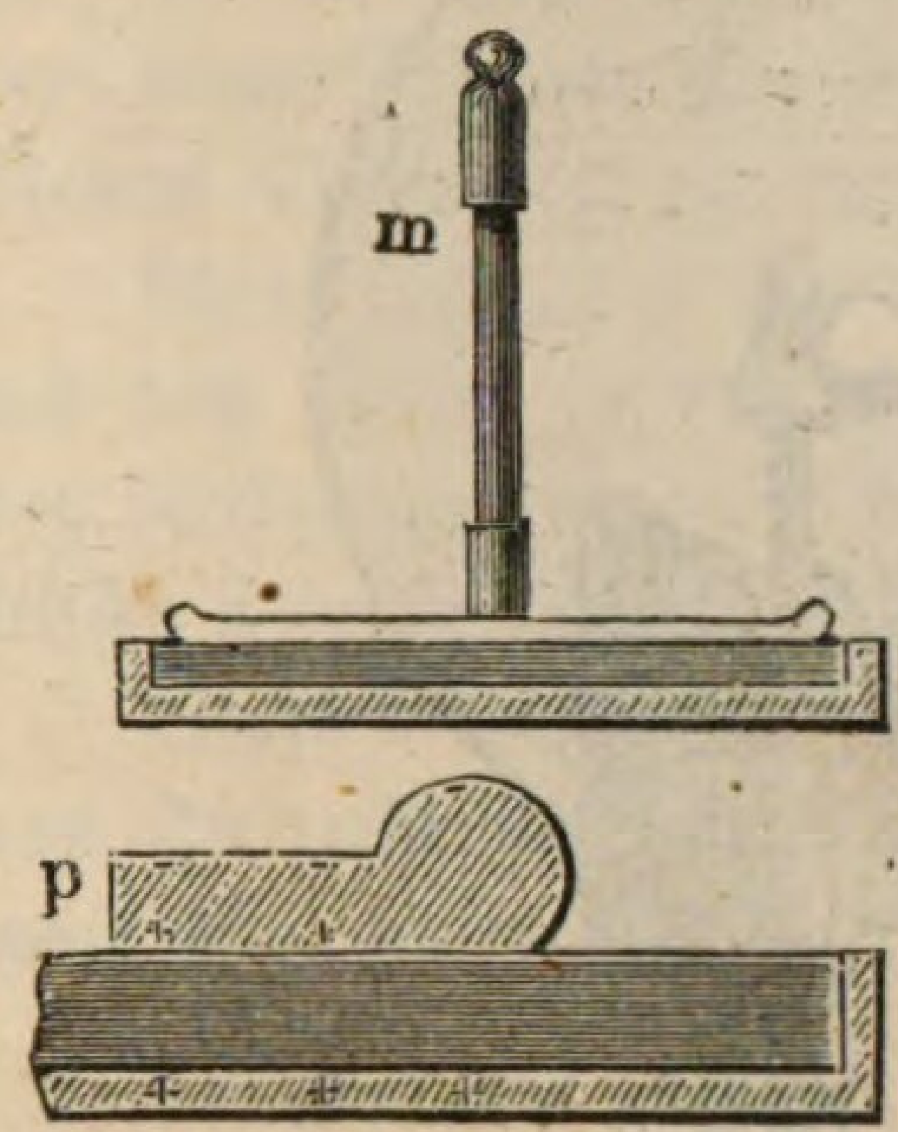
Die oben beschriebenen Anziehungserscheinungen finden durch die Gesetze der elektrischen Vertheilung nun auch ihre Erklärung. Wenn einem Körper, der sich im natürlichen Zustande befindet, ein elektrischer genähert wird, so werden seine Elektricitäten zerlegt. Dies ist nun auch bei dem Korkkügelchen des einfachen elektrischen Pendels der Fall. Ist es an einem Seidenfaden aufgehängt, so kann die abgestoßene *E* nicht aus dem Kügelchen entweichen, sie wird auf die hintere Seite des Kügelchens getrieben, während sich die angezogene auf der Vorderseite anhäuft. Weil aber die angezogene *E* dem Körper, von welchem die Wirkung ausgeht, näher ist, so ist die Anziehung stärker als die Abstoßung; die Kraft, welche das Kügelchen gegen den elektrischen Körper hintreibt, ist der Differenz dieser beiden entgegengesetzten Kräfte gleich; darum wird auch hier erst bei sehr geringer Entfernung des elektrischen Körpers eine Anziehung erfolgen. Weit energischer ist die Wirkung, wenn das Kügelchen an einem leitenden

Faden aufgehängt ist, weil alsdann die abgestoßene *E* entweichen kann und durch sie die Anziehung nicht geschwächt wird.

Ein Kügelchen von Schellack wird bei Annäherung eines elektrischen Körpers nicht angezogen, weil der genäherte Körper nur sehr schwere Vertheilung in demselben hervorbringen kann. Es ist dies eine Erscheinung, welche der ähnlich ist, daß ein Magnet in einem Stücke weichen Eisens eine magnetische Vertheilung hervorbringt, in einem Stück Stahl aber ungleich schwieriger.

Das Elektrophor ist eines der wichtigsten elektrischen Apparate und 172
kann in vielen Fällen selbst die Elektrisirmaschine ersetzen. Es besteht aus einem Harzkuchen, welcher, wie Fig. 381 zeigt, in eine metallene Form, gleichsam einen Teller von Metall, gegossen ist, oder auch aus einem Harzkuchen, den man nur auf eine etwas größere Platte von Metall auflegt. Es ist sehr wesentlich, daß die Oberfläche des Harzkuchens möglichst eben sey. Auf diesen Harzkuchen, dessen Oberfläche durch Schlagen mit einem Fuchsschwanze oder einem Katzenpelze negativ elektrisch gemacht wird, setzt man einen mit einer isolirenden Handhabe *m* versehenen Deckel von Metall platt auf. Die — *E* des Harzkuchens wirkt vertheilend auf die bis dahin noch verbundenen Elektricitäten im Deckel, die + *E* wird angezogen, die — *E* aber abgestoßen; die + *E* wird sich deshalb im unteren, die — *E* im oberen Theile des Deckels anhäufen.

Fig. 381.



Nähert man dem Deckel den Knöchel eines Fingers, so springt ein Funken über, und wenn man den Deckel mit dem Finger berührt, so wird alle — *E* sich entfernen und der Deckel sich mit + *E* laden, die aber durch die — *E* des Harzkuchens gebunden ist, so lange der Deckel auf demselben liegen bleibt. Hebt man aber den Deckel von dem Kuchen ab, indem man ihn an der isolirenden Handhabe anfaßt, so wird diese + *E* frei, und man kann nun aus dem Deckel einen Funken positiver Elektricität ziehen.

Auch von Gutta Percha lassen sich gute Elektrophore machen.

Für die Metallplatte, auf welche man den Harzkuchen legt, kann man eine Zinkplatte nehmen. Der Deckel ist in der Regel von Messing und mit einem abgerundeten Rande versehen. Man kann jedoch auch Deckel von Glas, Holz oder Pappe anwenden, die mit Stanniol überzogen sind; nur muß dafür gesorgt seyn, daß die untere Fläche, welche auf den Harzkuchen zu liegen kommt, wie dieser selbst, möglichst eben sey. Statt der isolirenden Handhabe von Glas kann man an dem Deckel auch drei Schnüre von Seide befestigen.

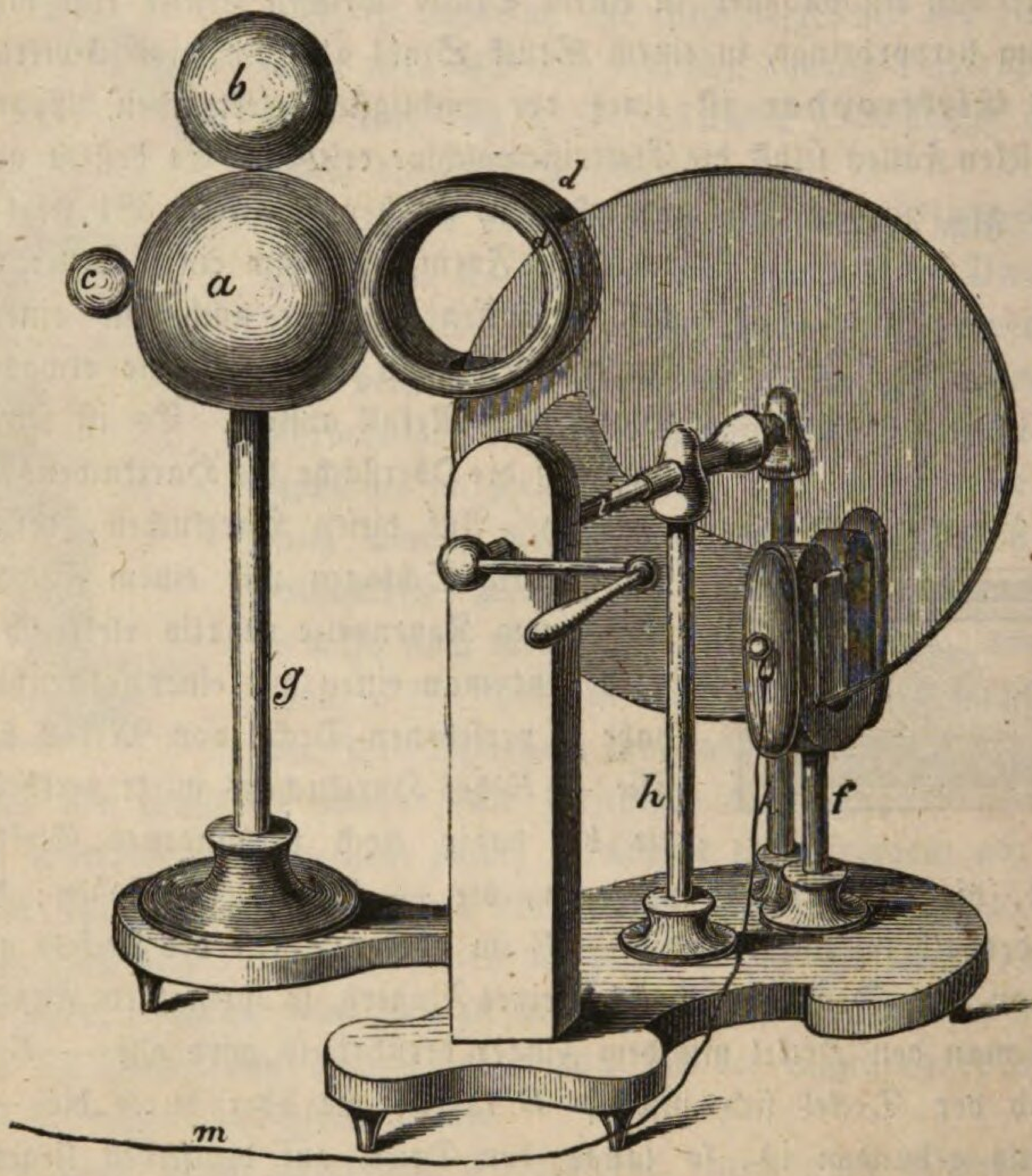
Die Elektrisirmaschine besteht aus einem reibenden Körper, einem 173
Reibzeuge und einem isolirten Leiter.

Der reibende Körper ist gewöhnlich ein mit Amalgam überzogenes Leder.
Der geriebene Körper ist eine Glasscheibe oder ein Glascylinder.

Der **Conductor** besteht aus Hohlkugeln oder Hohlcylindern von Messingblech, welche durch Glasfüße getragen werden.

Man hat der Elektrisirmaschine mancherlei verschiedene Einrichtungen gegeben; eine sehr zweckmäßige ist die in Fig. 382 abgebildete. Die Umdrehungs-

Fig. 382.



axe der Scheibe ist von Glas; sie wird durch die Glasfüße *h* getragen. Die Reibzeuge stecken in einem durch den Glasfuß *f* getragenen Holzgestell. In dem Conductor *a* steckt die Saugvorrichtung *d*; sie besteht hier aus zwei Holzringen, zwischen welchen sich die Scheibe hindurchbewegt. Auf der der Scheibe zugewendeten Seite ist jeder der Holzringe mit einer Rinne versehen, welche mit Stanniol ausgelegt ist und auf deren Boden eine Reihe von Metallspitzen aufgesetzt sind, die gegen die Scheibe gerichtet sind. Ein Stanniolstreifen muß die Rinnen leitend mit dem Conductor *a* verbinden. — Auch das Gestell des Reibzeugs ist mit einem kleinen messingenen Conductor versehen.

Wird die Glasscheibe gedreht, so wird sie durch die Reibung am amalgamirten Leder + elektrisch; an der Saugvorrichtung angekommen, wirkt die + *E* der Scheibe zersetzend auf den Conductor; die — *E* wird angezogen und strömt von den Spitzen auf die Scheibe über, um sie wieder in den natürlichen Zustand zu versetzen, d. h. ihre + *E* mehr oder weniger vollständig zu neutralisiren. Auf dem **Conductor bleibt** + *E* **zurück**.

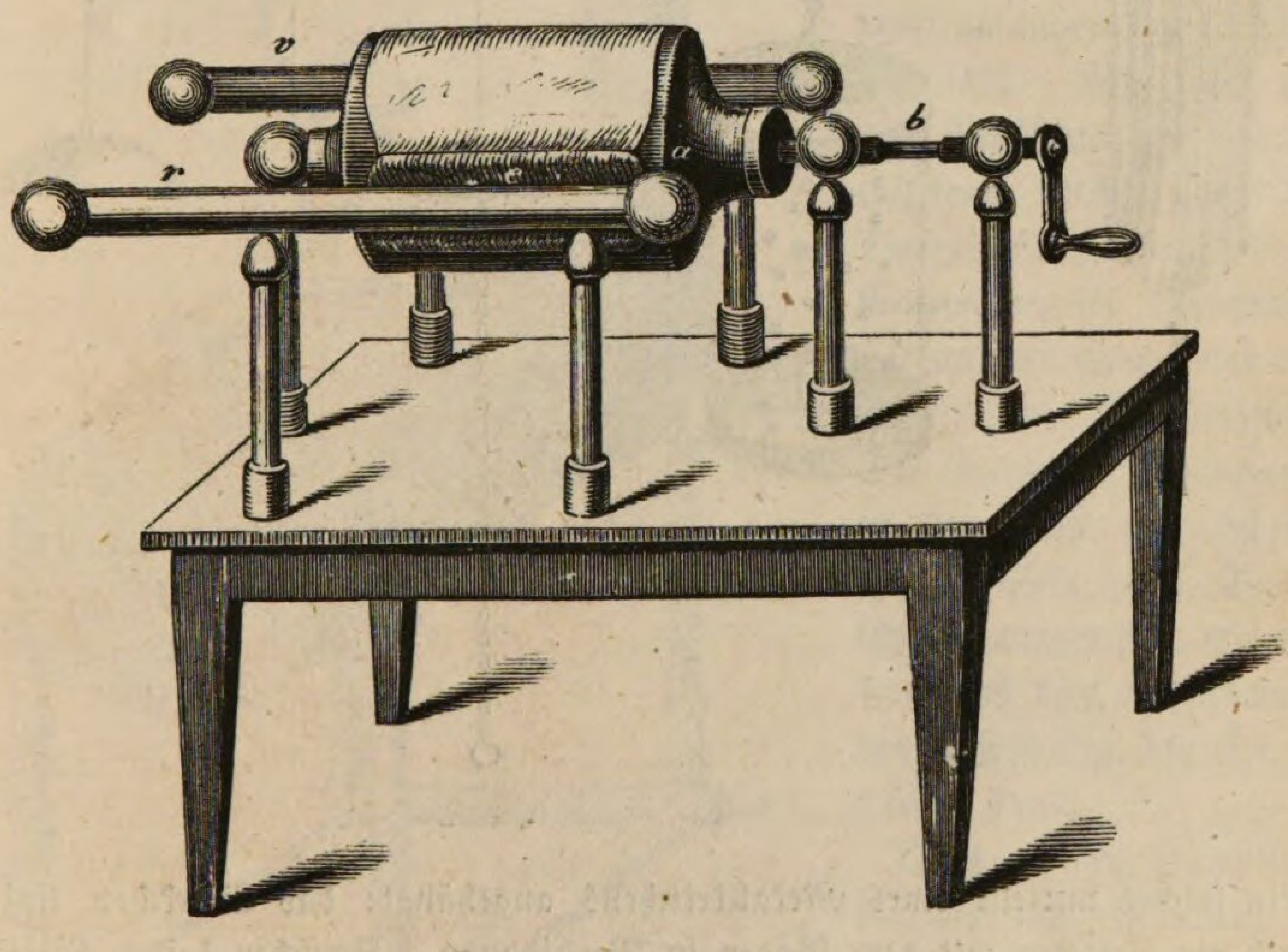
Damit sich auf dem Wege von dem Reibzeuge bis zu den Saugringen die Elektricität des Glases nicht so leicht in die Luft verliere, ist hier die Scheibe auf beiden Seiten mit Stücken von Wachstaffet bedeckt. Wenn die Maschine kräftig wirken soll, so muß man unmittelbar vor dem Gebrauche die Glasfüße und die Scheibe mit warmen wollenen Lappen oder mit gewärmtem, recht trockenem Löschpapier reiben.

Die — *E* des Reibzeuges strömt in den Boden über, und es ist in der That nöthig, daß sie frei abfließt; denn wenn sie auf dem Kissen bliebe, so würde sie bald eine solche Spannung erreicht haben, daß sie theilweise auf die Glasplatte überströmen und die positive Elektricität neutralisiren würde. Die durch Reiben frei gewordenen Elektricitäten müssen von der Stelle, wo sie frei wurden, weggeführt werden, wenn an derselben Stelle durch ferneres Reiben von Neuem Elektricität erregt werden soll.

Wenn man den Conductor des Reibzeuges isolirt, dagegen den Conductor *a* mit dem Boden in leitende Verbindung bringt, so häuft sich auf dem Conductor des Reibzeuges negative Elektricität an und man kann aus ihm negativ elektrische Funken ziehen.

Statt der Glasscheiben wendet man auch Glascylinder zur Construction von Elektrisirmaschinen an. Fig. 383 stellt eine Cylindermaschine dar, welche wohl ohne weitere Erläuterung verständlich seyn wird.

Fig. 383.



Mit Hülfe der Elektrisirmaschine lassen sich die elektrischen Anziehungs- und Abstoßungserscheinungen in mannigfachen Abänderungen zeigen. Steckt

man z. B. das Metallstäbchen, Fig. 384, welches oben ein Scheibchen trägt, von dem schmale Papierstreifen herabhängen, auf den Conductor, so werden sich dieselben schirmartig ausbreiten, wenn die Maschine gedreht wird. — Fig. 385 stellt einen Glascylinder von 3 bis 4 Zoll Durchmesser dar, welcher oben und unten mit einer Metallplatte endigt; auf der unteren, welche gut abgeleitet ist, liegen einige Hollundermarkkügelchen, die obere ist durch eine Metallkette mit dem Conductor der Elektrisirmaschine verbunden. Sobald die Maschine gedreht wird, tanzen die Kügelchen zwischen dem oberen und unteren Deckel hin und her. Fig. 386 stellt das elektrische Glockenspiel dar. An den Conductor der Maschine wird der Drahthaken *b* angehängt, welcher den Draht *a c* (Fig. 386) trägt; bei *a* ist ein Metallglöckchen mittelst eines Seidenfadens, bei

Fig. 384.

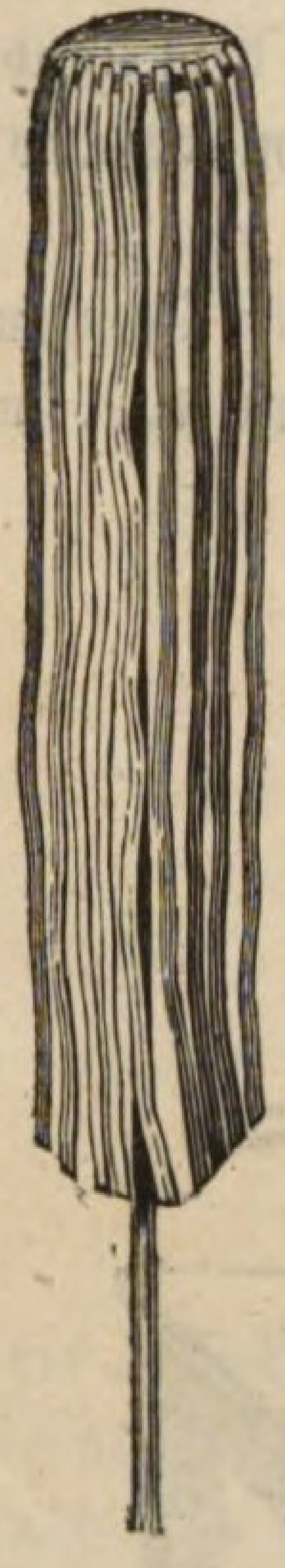
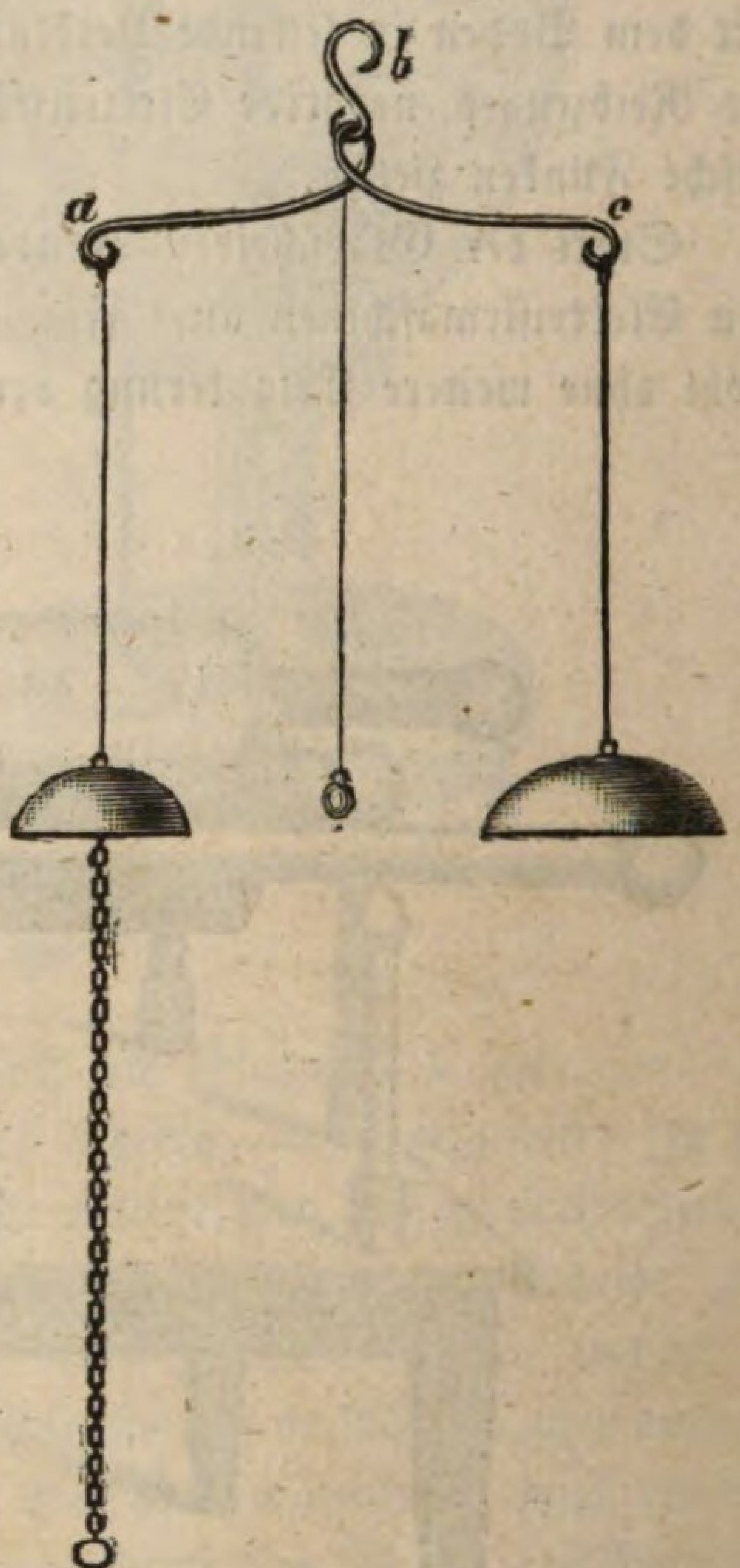


Fig. 385.



Fig. 386.



c ein solches mittelst eines Metallkettchens angehängt; das Glöckchen links ist durch ein Kettchen mit dem Boden in Verbindung. Zwischen beiden Glöckchen hängt an einem Seidenfaden ein kleines Metallkügelchen, welches zwischen denselben hin und her spielt, sobald man die Maschine dreht. — Die Erklärung dieses Spiels ergiebt sich von selbst.

Fig. 387 erläutert die zweckmäßigste Art, mit Hülfe des elektrischen Funkens Weingeist oder Aether anzuzünden. Man läßt in die in einem Metalllöffel befindliche Flüssigkeit von oben her den Funken überschlagen.

Fig. 387.

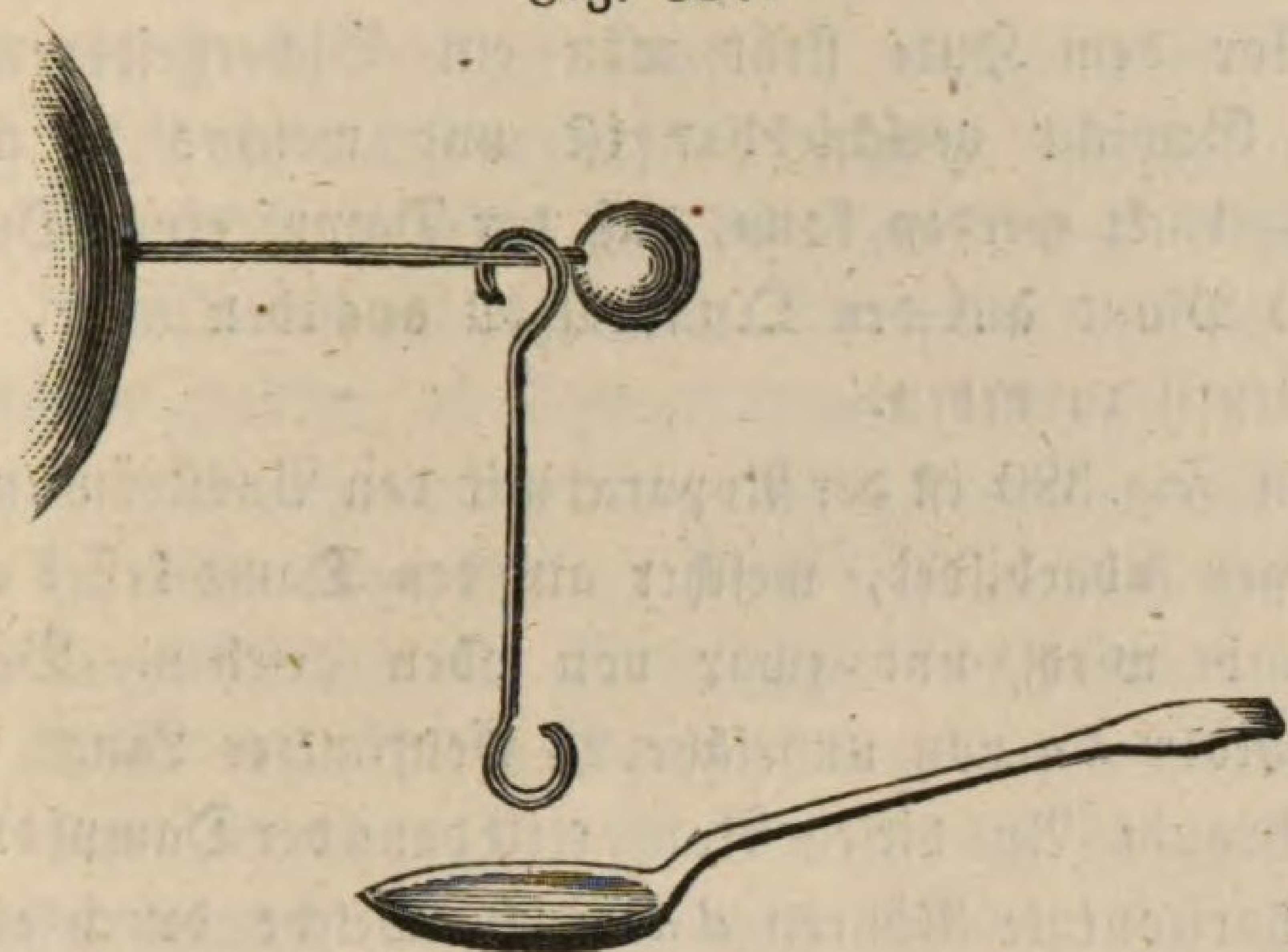
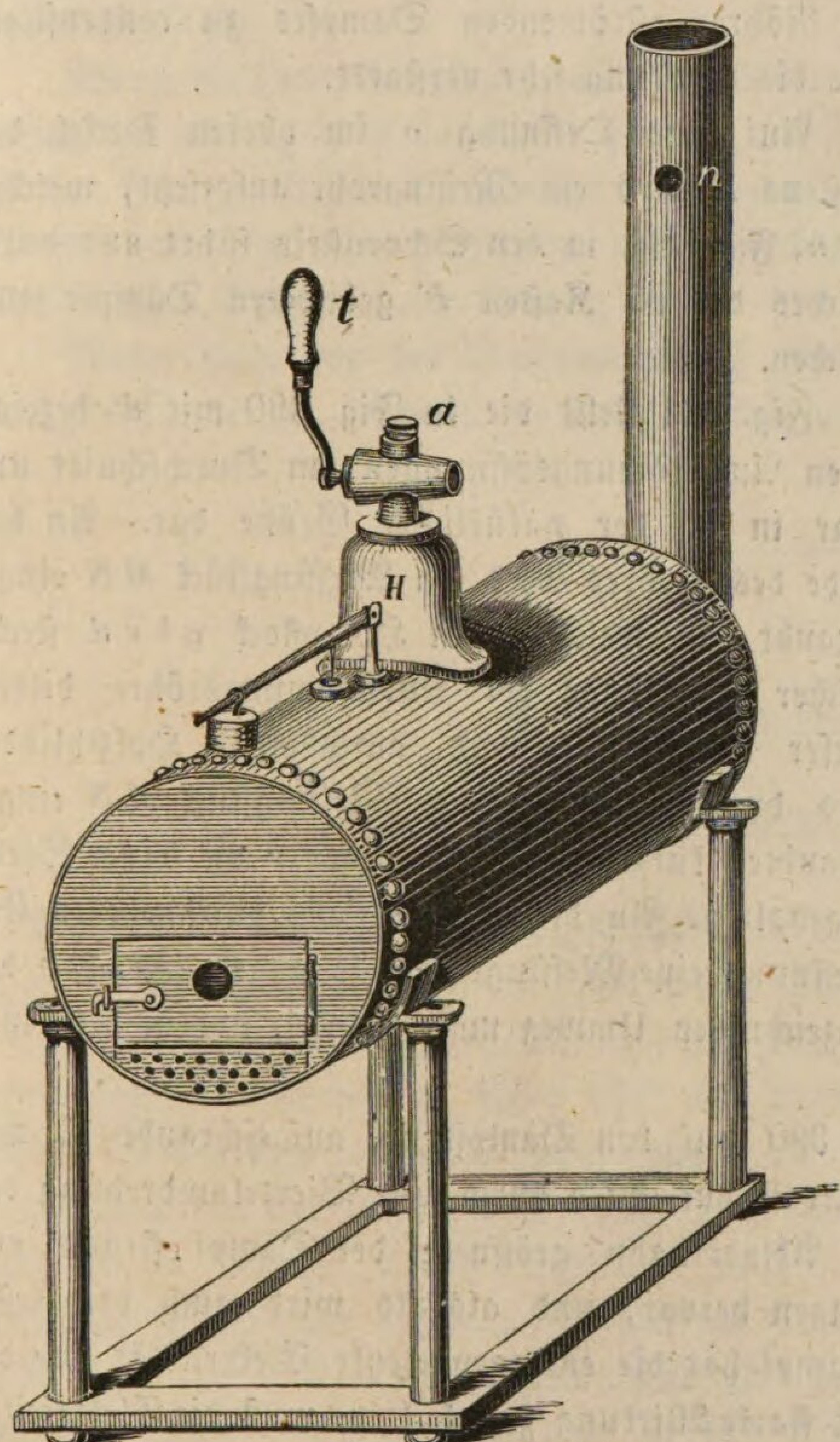


Fig. 388.

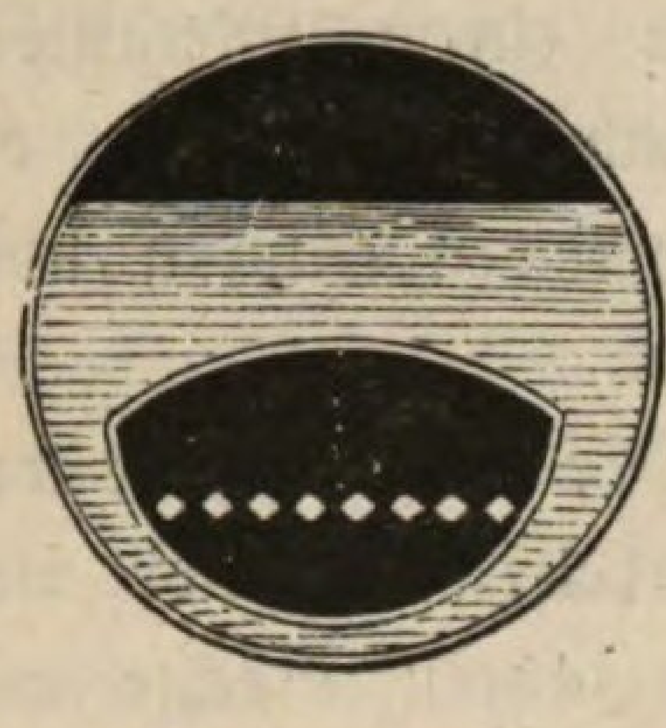


Die Dampfelektri- 174
sirmaschine. Vor mehreren Jahren machte man in England zufällig die Entdeckung, daß ein Dampfkessel, aus welchem durch eine kleine Oeffnung Dampf mit Gewalt hervordrang, stark elektrisch war; durch weiteres Verfolgen dieser Entdeckung gelangte man dahin, aus einem Dampfkessel eine Elektrisirmaschine zu machen, deren Wirkung alle bis jetzt bekannten Elektrisirmaschinen weit hinter sich läßt. Fig. 388 stellt eine Maschine der Art von mittlerer Größe dar. Der Dampfkessel, welcher 44 Centimeter im Durchmesser hat und 96 Centimeter lang ist, ruht auf vier Glasfüßen. Die Heizung ist inwendig in der Weise wie bei den Dampfkesseln auf Dampfschiffen angebracht, wie man dies aus dem Durchschnitte des Kessels Fig. 389 (s. f. S.) ersehen kann.

Oben auf dem Dampfkessel befindet sich ein Hut, auf welchem ein kurzes, durch einen Hahn verschließbares Messingrohr befestigt ist; auf dieses kurze Rohr können

dann die Ausströmungsöffnungen aufgeschraubt werden, die alsbald näher beschrieben werden sollen.

Fig. 389.

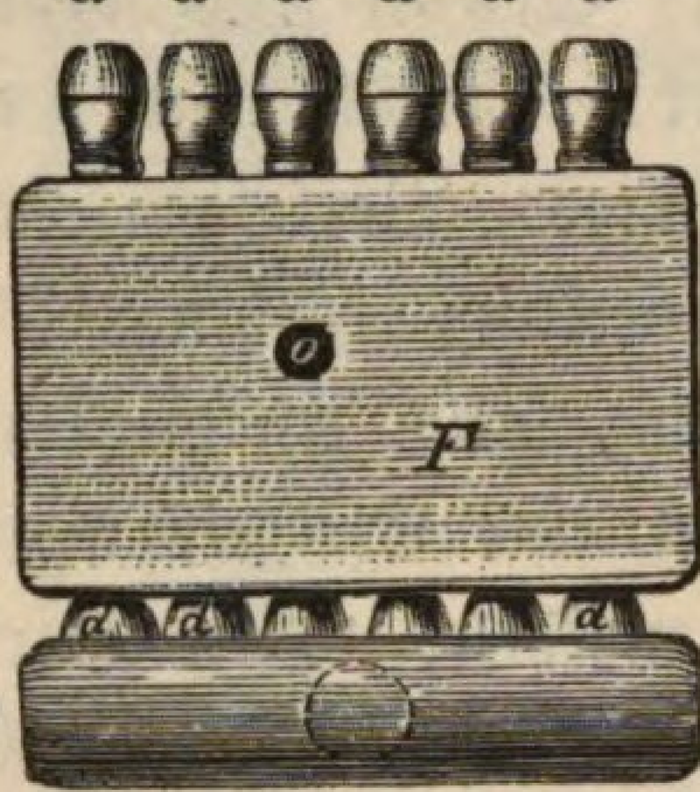


Vor dem Hute sieht man ein Sicherheitsventil, dessen Gewicht verschiebbar ist und welches so weit herausgerückt werden kann, daß der Dampf einen Druck von 90 Pfund auf den Quadratzoll ausüben muß, um das Ventil zu heben.

In Fig. 390 ist der Apparat mit den Ausströmungsöffnungen abgebildet, welcher auf den Dampfkessel aufgeschraubt wird, und zwar von oben gesehen. Bei *a* Fig. 388 wird das gußeiserne Rohr *bc* von ungefähr 24 Centimeter Länge und 5 Centimeter Durchmesser angeschraubt. Aus diesem Rohre tritt dann der Dampf durch 6 horizontale Röhren *d d'* aus, welche durch einen Kasten von Messingblech hindurchgehen, der mit kaltem Wasser gefüllt wird, um einen Theil des durch die Röhren strömenden Dampfes zu condensiren, was die Wirkung sehr verstärkt.

Fig. 390.

d' d' d' d' d' d'

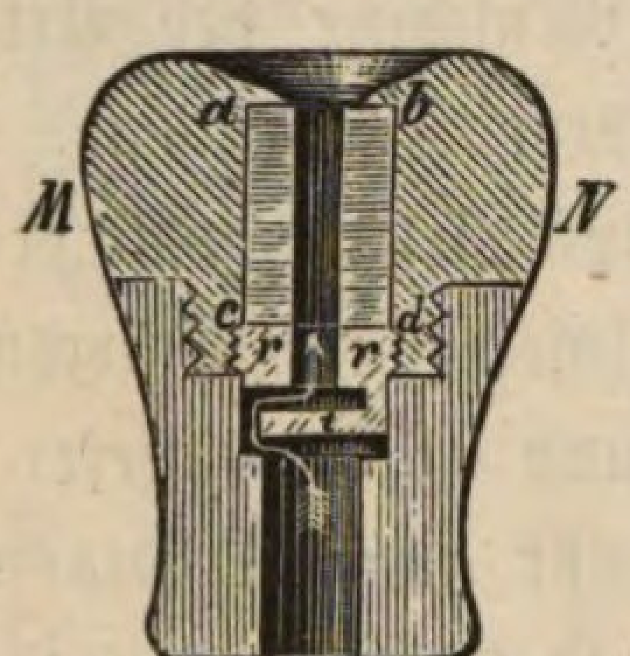


c *b*

Auf eine Oeffnung *o* im oberen Deckel des Kastens *F* wird ein Messingrohr aufgesetzt, welches bei *n*, Fig. 388, in den Schornstein führt und durch welches die im Kasten *F* gebildeten Dämpfe entweichen.

Fig. 391 stellt die in Fig. 390 mit *d'* bezeichneten Ausströmungsöffnungen im Durchschnitt und zwar in ½ der natürlichen Größe dar. An das Ende des Rohres wird ein Messingstück *MN* eingeschraubt, in welchem ein Holzpflock *a b c d* steckt, welcher das Ende der Ausströmungsröhre bildet. Dieser der Länge nach durchbohrte Holzcylinder wird durch einen in das Messingstück *MN* eingeschraubten kurzen Messingcylinder *r* an seiner Stelle festgehalten. An diesem gleichfalls durchbohrten Cylinder *r* ist vorn vor seiner Oeffnung eine Messingplatte so angebracht, daß der Dampf den durch den Pfeil bezeichneten Umweg machen muß, um in die Ausströmungsöffnung zu gelangen.

Fig. 391.



Wenn der Apparat Fig. 390 auf den Dampfkessel aufgeschraubt ist und der Dampf die nöthige Spannkraft hat, wird durch eine Viertelumdrehung des Handgriffs *t*, Fig. 388, der Absperrhahn geöffnet; der Dampf strömt mit Gewalt aus den sechs Oeffnungen hervor, und alsbald wird auch der Kessel elektrisch. Der entweichende Dampf hat die entgegengesetzte Elektricität wie der Kessel; um aber eine möglichst starke Wirkung zu erhalten, muß die Elektricität des Dampfes möglichst abgeleitet werden; dies geschieht dadurch, daß man in den Dampfstrom eine Reihe von Metallspitzen stellt, welche, an einem mes-

fingenen Conductor befestigt, mit dem Boden in leitender Verbindung stehen. Dieser Conductor steht auf einem Glasfuße, so daß man ihn isoliren kann, um zu zeigen, daß der Dampf in der That die entgegengesetzte Elektricität des Kessels hat.

Mit dieser Hydroelektrisirmaschine läßt sich eine Batterie von 36 Quadratfuß Oberfläche in Zeit von 30 Secunden vollständig laden.

Die Quelle dieser starken Elektricitätsentwickelung ist nicht etwa, wie man anfangs glaubte, die Dampfbildung selbst, sondern lediglich die Reibung des mit Wassertheilchen vermischten heftig ausströmenden Dampfes an den Wänden der Ausströmungsröhren. Daß dies wirklich der Fall ist, geht daraus hervor, daß augenblicklich alle Elektricität verschwindet, wenn man das Sicherheitsventil öffnet, obgleich die Dampfbildung ununterbrochen fortdauert.

Zur Erzeugung der Elektricität ist es wesentlich, daß schon condensirte Wassertheilchen durch den ausströmenden Dampf mit durch die Ausströmungsröhren durchgetrieben werden; deshalb der Condensationsapparat *F*, Fig. 390. Wenn die Ausströmungsröhren lang genug sind, ist kein besonderer Abkühlungsapparat nöthig.

Wenn die Dampfmündung durch eine Holzröhre gebildet wird, wie es oben angegeben wurde, so ist der Kessel negativ, der Dampf positiv elektrisch; dasselbe ist der Fall bei Anwendung einer metallenen oder gläsernen Dampfmündung. Wendet man statt der hölzernen eine elfenbeinerne Röhre an, so zeigt der Kessel kaum Spuren einer Ladung.

Wenn man vor der Dampfmündung etwas Terpentinöl in die Ausströmungsröhre bringt, so wird der Kessel positiv und der Dampf negativ elektrisch.

Drittes Kapitel.

Von den elektrischen Kräften.

Abnahme der elektrischen Kräfte mit zunehmender Entfernung. 175
Das Gesetz, nach welchem die elektrischen Anziehungen und Abstoßungen mit wachsender Entfernung abnehmen, läßt sich durch die Oscillationen eines elektrischen Pendels nachweisen. Man läßt eine kleine Nadel von Schellack, die an einem Seidenfaden horizontal aufgehangen ist und an ihrem einen Ende ein Scheibchen von Blattgold trägt, welches elektrisirt ist, unter dem Einflusse einer elektrisirten isolirten Kugel oscilliren. Ist die Kugel und das Scheibchen mit derselben Elektricität geladen, so bildet das Scheibchen das der Kugel abgewendete Ende des elektrischen Pendels; sind aber die Elektricitäten des Scheibchens und der Kugel entgegengesetzt, so ist das Scheibchen der Kugel zugewendet. Aus den Oscillationen des elektrischen Pendels kann man auf die dasselbe beschleunigenden Kräfte in ähnlicher Weise schließen. Aus solchen Versuchen er-

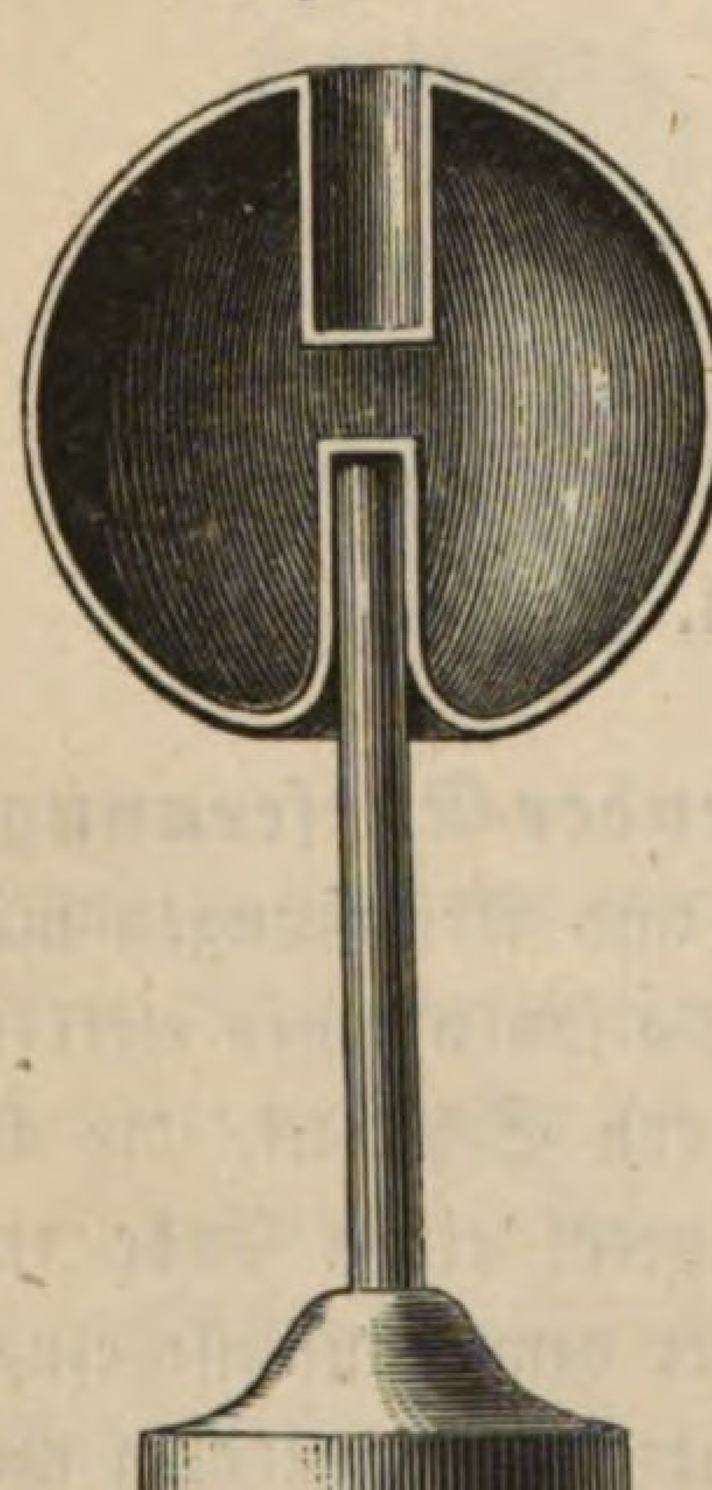
giebt sich, daß die elektrischen Anziehungen und Abstoßungen im umgekehrten Verhältniß des Quadrats der Entfernung stehen.

176 **Vertheilung der Elektricität auf der Oberfläche leitender Körper.** So lange ein Körper im natürlichen Zustande sich befindet, d. h. so lange die beiden elektrischen Fluida noch verbunden sind, sind sie wahrscheinlich ganz gleichförmig in der ganzen Masse der Körper vertheilt. Sobald aber die eine Flüssigkeit von der anderen getrennt ist, sobald ein Leiter mit freier Elektricität geladen ist, wirken die einzelnen Elemente dieser freien Elektricität abstoßend auf einander und entfernen sich deshalb so weit von einander als nur irgend möglich ist, bis sie durch irgend ein Hinderniß aufgehalten werden. Ein vollkommen leitender Körper kann in seinem Inneren dieser Dispersion kein Hinderniß entgegensetzen; die Elektricität verbreitet sich deshalb auf seine Oberfläche und würde sich noch weiter zerstreuen, wenn sich der Körper in einem für die Elektricität leicht durchdringlichen Raume befände. Die Elektricität verbreitet sich also stets auf der Oberfläche der Leiter und wird auf derselben durch die Luft zurückgehalten, welche sie gleichsam wie eine nicht leitende Schicht umgiebt.

Daß sich die freie Elektricität nur auf die Oberfläche der Körper und nicht im Inneren derselben verbreitet, läßt sich am einfachsten durch folgenden Versuch darthun:

Eine isolirte Kugel von Messingblech, welche mit einer Höhlung versehen und durch einen Glasfuß isolirt ist, wie Fig. 392 zeigt, werde mit Elektricität geladen. Wenn man nun die Oberfläche dieser Kugel an irgend einer Stelle mit einem Probescheibchen berührt, so nimmt es Elektricität auf: wenn man aber den Boden der Höhlung mit dem Probescheibchen berührt, so bleibt es in seinem natürlichen Zustande.

Fig. 392.



Es fragt sich nun, in welcher Weise sich die Elektricität auf der Oberfläche der Körper vertheilt.

Elektrisirt man eine isolirte Kugel, so erfordert schon das Gesetz der Symmetrie, daß sich die Elektricität auf der ganzen Oberfläche gleichförmig verbreitet, daß sie eine Schicht bildet, welche überall gleiche Dichtigkeit hat. Aber auch durch den Versuch kann man sich davon überzeugen, daß es wirklich so ist. Berührt man nämlich die elektrisirte Kugel an irgend einer Stelle mit einem Probescheibchen, so bildet dasselbe hier gleichsam ein Element der Kugeloberfläche, und es verbreitet sich auf dem Probescheibchen gerade so viel Elektricität, als sich auf dem bedeckten Kugelstücke befand; hebt man nun das Scheibchen ab, so kann man die Stärke seiner elektrischen Ladung dadurch bestimmen, daß man die Platte eines Elektroskops mit diesem Probescheibchen berührt. Die Divergenz der Gold-

blättchen ist immer dieselbe, an welche Stelle der Kugeloberfläche man auch das Probescheibchen aufsetzen mag.

Wenn der isolirte Leiter, den man elektrisirt, nicht kugelförmig ist, so findet auch keine gleichmäßige Vertheilung der Elektricität Statt, d. h. die elektrische Schicht, welche sich über den Körper verbreitet, hat nicht überall gleiche Dichtigkeit. Untersucht man mit Hülfe eines Probescheibchens die Dichtigkeit der Elektricität an verschiedenen Stellen eines Cylinders (Fig. 393) mit abgerundeten Enden, so findet man, daß die Dichtigkeit der Elektricität an den Enden weit größer ist als in der Mitte. Noch weit stärker wird das Probescheibchen geladen, wenn man es so an das Ende des Cylinders hält, daß seine Fläche nicht auf dem Cylinder aufliegt, sondern daß seine Ebene in die Verlängerung der Cylinderaxe fällt. Ganz ähnliche Resultate erhält man, wenn man den elektrischen Zustand einer Scheibe, etwa eines Elektrophordeckels, untersucht.

Fig. 393.



Daß eine solche Vertheilung der Elektricität auf der Oberfläche von Körpern stattfinden müsse, welche nach verschiedenen Richtungen hin ungleiche Ausdehnung haben, läßt sich leicht einsehen; denn in Folge der gegenseitigen Abstoßung der einzelnen Theilchen des elektrischen Fluidums werden sie sich möglichst weit von der Mitte des Körpers entfernen, also in den entferntesten Hervorragungen anhäufen.

Je mehr sich die Gestalt eines Körpers von der Kugelgestalt entfernt, desto ungleichförmiger vertheilt sich die Elektricität auf seine Oberfläche, sie häuft sich an den von seiner Mitte entfernteren Enden am meisten an, und zwar um so mehr, je dünner sie sind. Es geht daraus hervor, daß, wenn man an einem isolirten Leiter eine Spitze anbringt, die Elektricität an dieser Spitze eine außerordentliche Dichtigkeit haben muß. Je dichter aber die Elektricität in einem Punkte ist, desto eher wird sie durch die Luft entweichen. Daher kommt es, daß aus Spitzen die Elektricität so leicht ausströmt. Man kann eine Menge von Versuchen anstellen, durch welche dieses Vermögen der Spitzen bewiesen wird; wir wollen jedoch nur einige hervorheben.

1) Wenn man den Conductor einer Elektrisirmaschine mit einer Spitze versieht, so ist es unmöglich, ihn so zu laden, daß man aus ihm Funken ziehen könnte, namentlich, wenn man der Spitze einen nicht isolirten Leiter entgegen hält.

2) Wenn man eine Spitze, die mit dem Boden in leitender Verbindung steht, dem Conductor der Maschine nähert, so ist es gleichfalls unmöglich, ihn zu laden. Die Elektricität des Conductors zerlegt die verbundenen Elektricitäten der Spitze, sie stößt die gleichnamige ab und zieht die ungleichnamige an; diese ungleichnamige Elektricität häuft sich in der

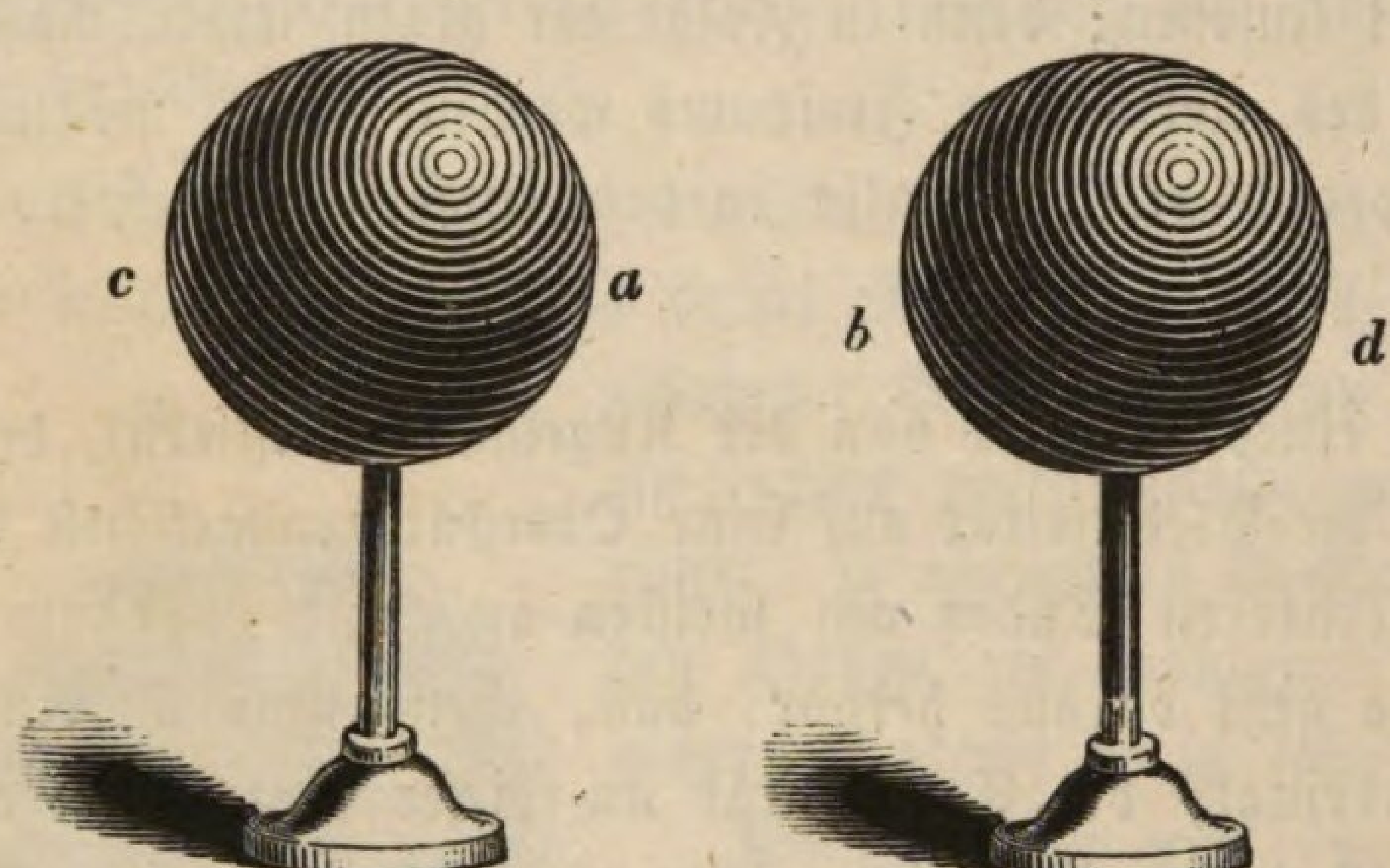
Spitze so stark an, daß sie nach dem Conductor überströmt, um seine Elektricität zu neutralisiren.

Auf die erwähnte Eigenschaft der Spitze gründet sich auch die Construction der **Blitzableiter**.

Winkel und scharfe Kanten, die sich an leitenden Körpern befinden, wirken ganz auf dieselbe Weise wie die Spitzen. Man muß deshalb sorgfältig alle eckigen Formen vermeiden, wenn man Apparate construiren will, welche bestimmt sind, die Elektricität zu erhalten.

Wenn einem isolirten elektrischen Leiter ein anderer Leiter genähert wird, so erleidet die Vertheilung der Elektricität auf den Oberflächen bedeutende Modificationen. Sobald einer elektrisirten isolirten Kugel eine andere gleichfalls isolirte und mit derselben Elektricität geladene genähert wird, hört die gleichförmige Vertheilung der Elektricität auf den Kugeloberflächen auf. Weil nämlich die *E* der einen Kugel die der anderen abstößt, so wird an denjenigen Punkten der Kugeln, welche einander zugewendet sind, die Dichtigkeit der *E* am kleinsten, an den entgegengesetzten Punkten aber am größten sein. Fig. 394 stellt zwei solcher Kugeln dar. In *a* und *b* ist die Dichtigkeit der *E* ein Minimum, in *c* und *d* ein Maximum. Je mehr man nun die Kugeln nähert, desto mehr wird die Dichtigkeit in *a* und *b* vermindert, in *c* und *d* aber vermehrt. Bringt man die beiden Kugeln in Berührung, so ist die Dichtigkeit der *E* an der Berührungsstelle gleich Null. Wären die beiden Kugeln mit entgegengesetzten Elektricitäten geladen gewesen, so hätte man in *a* und *b* die größte, in *c* und *d* die geringste Dichtigkeit gefunden. Die Anhäufung der *E* in *a* und *b* nimmt zu, wenn man die Kugeln nähert, bis endlich ein Funken überspringt.

Fig. 394.



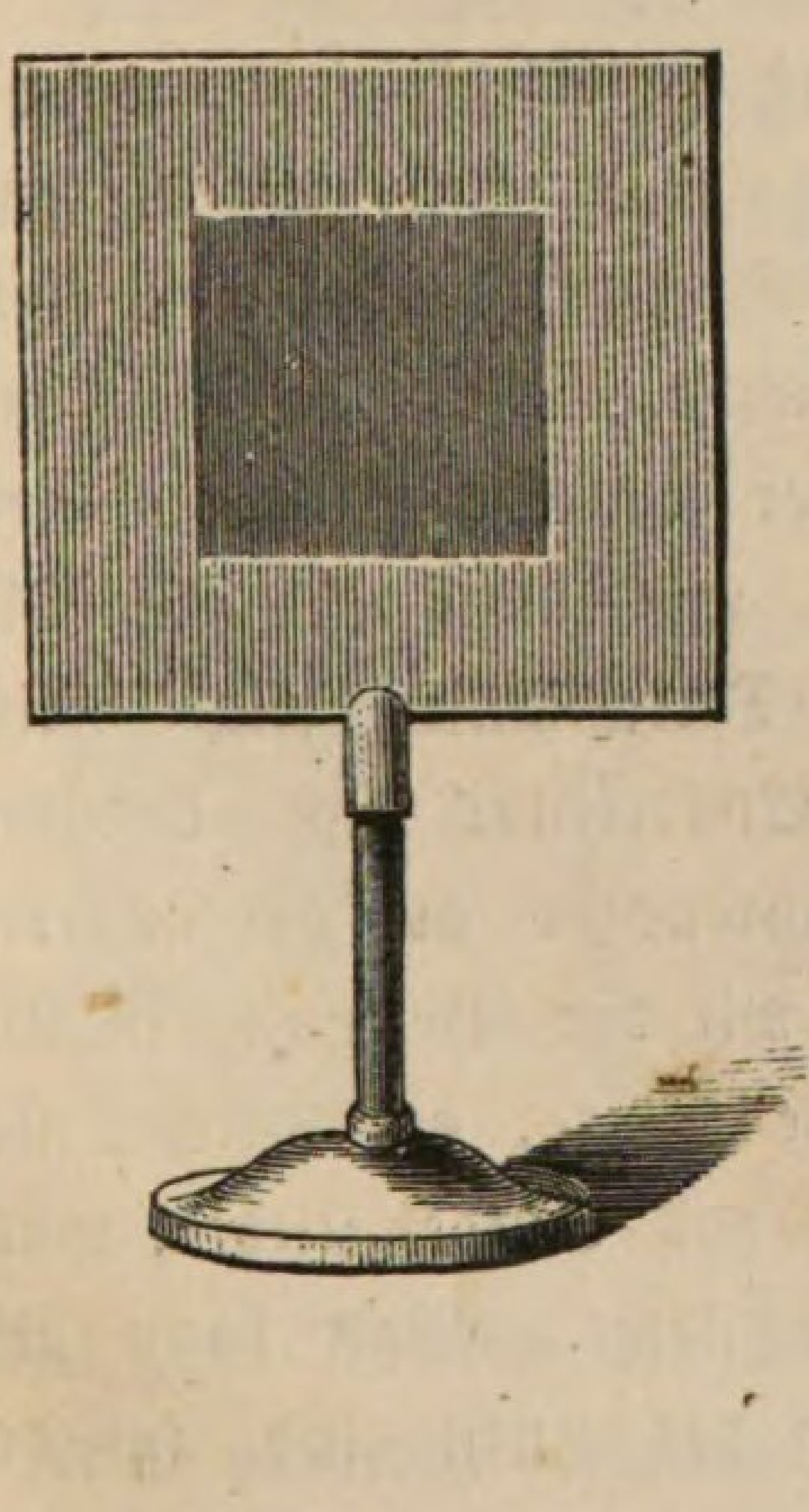
Ein nicht elektrisirter Leiter, in die Nähe eines elektrisirten isolirten gebracht, wirkt ganz in der Weise, wie ein mit der entgegengesetzten Elektricität geladener Körper, weil er ja bei der Annäherung durch Induction elektrisch wird.

Viertes Kapitel.

Von der gebundenen Elektricität.

Wir haben schon gesehen, daß, wenn zwei isolirte Leiter, mit entgegengesetzten Elektricitäten geladen, durch eine Luftschicht getrennt sind, die Elektricität des einen die des anderen in der Weise anzieht, daß man abwechselnd den einen oder den anderen der beiden Körper mit dem Boden in leitende Verbindung setzen kann, ohne daß seine Elektricität vollständig abgeleitet wird. In Fig. 394 sey z. B. die Kugel links mit positiver, die rechts mit negativer Elektricität geladen, so kann man die eine Kugel mit dem Finger berühren, ohne daß sie ihre Ladung verliert. Die Elektricität auf der einen Kugel wird durch die entgegengesetzte *E* auf der anderen angezogen, sie kann sich nicht entfernen, sie ist gebunden. Je näher die beiden Elektricitäten einander gebracht werden, desto stärker ziehen sie sich an, desto vollständiger ist also auch ihre gegenseitige Bindung; wenn aber die beiden Leiter nur durch eine Luftschicht getrennt sind, so kann die Bindung nicht sehr vollständig seyn, weil man die Leiter nicht sehr nähern kann, ohne daß die Luftschicht durchbrochen wird und ein Funken überspringt. Wenn also die Bindung möglichst vollkommen seyn soll, so müssen die beiden mit entgegengesetzten Elektricitäten geladenen Leiter nicht durch Luft, sondern durch einen anderen Isolator getrennt seyn, welcher dem Uebergange der Elektricität einen größeren Widerstand entgegensetzt; man wählt dazu am besten Glas oder Harz. 177

Fig. 395.



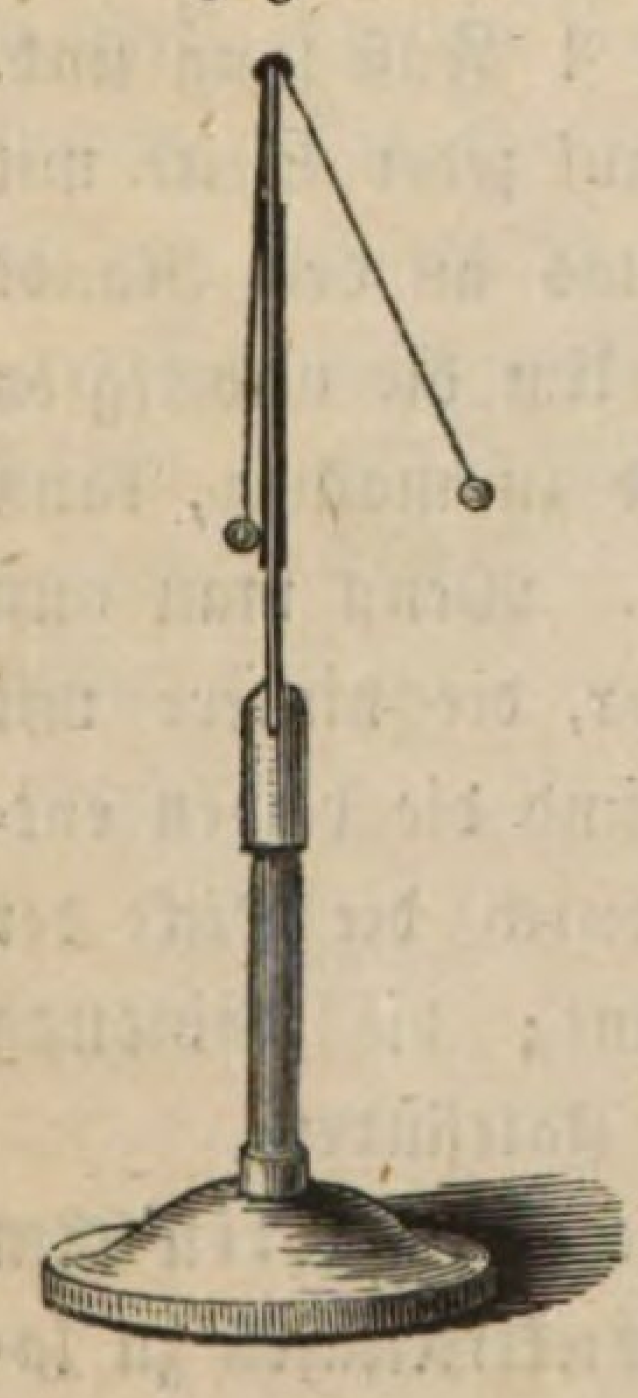
Um die Eigenschaften der gebundenen Elektricität näher zu untersuchen, ist die Franklin'sche Tafel ganz besonders geeignet. Fig. 395 stellt eine Glastafel vor, deren Seiten ungefähr 1 Fuß lang sind. In der Mitte ist die Glastafel auf jeder Seite mit Stanniol belegt, so daß das Glas an dem Rande ungefähr handbreit frei bleibt. Um die unbelegten Stellen des Glases besser isolirend zu machen, kann man sie mit Firniß überstreichen. Wenn man nun die vordere Belegung mit positiver, die hintere mit negativer Elektricität ladet, so sind die beiden entgegengesetzten Elektricitäten nur durch die Dicke der Glasscheibe von einander getrennt; die Bindung wird also hier ziemlich vollständig stattfinden.

Um die beiden Belegungen der Franklin'schen Tafel mit den entgegengesetzten Elektricitäten zu la-

den, hat man nicht nöthig, jede mit einer Elektricitätsquelle in Verbindung zu bringen. Man bringe die eine Belegung, etwa die vordere, mit dem Conductor der Elektrisirmaschine in leitende Verbindung, so wird ein Theil der + *E* vom Conductor auf die Belegung übergehen. Die Elektricität auf der vorderen Belegung wirkt vertheilend auf die verbundenen Elektricitäten der hinteren; und sobald man diese mit dem Boden in leitende Verbindung setzt, strömt die + *E* in den Boden über und die — *E* verbreitet sich auf der hinteren Belegung. Die — *E* auf der hinteren Belegung wirkt aber bindend auf die + *E* der vorderen, und dadurch wird es möglich, daß von Neuem Elektricität vom Conductor aus auf die vordere Belegung übergeht, die auch durch ihre vertheilende Kraft wieder die — *E* auf der hinteren Belegung vermehrt. Man kann auf diese Weise leicht die eine Belegung mit + *E*, die andere mit — *E* laden.

So klein auch die Entfernung der beiden Belegungen seyn mag, so ist doch die gegenseitige Bindung nicht vollständig. Damit auf der einen Seite die *E* vollständig gebunden sey, muß auf der anderen Seite ein Ueberschuß von Elektricität, also freie *E* vorhanden seyn. Man berühre die eine Belegung der geladenen Franklin'schen Tafel, etwa die hintere, mit dem Finger, während die vordere nicht mehr mit dem Conductor verbunden ist, so kann man nur etwas *E* ableiten; auf der hinteren Belegung bleibt immer noch eine starke Ladung — *E* zurück, welche vollständig gebunden ist. Damit aber diese — *E* vollständig gebunden sey, ist durchaus erforderlich, daß auf der anderen Seite ein Ueberschuß von + *E* sich befinde. Daß es auch wirklich so sey, davon kann man sich leicht überzeugen. Nachdem man alle nicht gebundene — *E* der hinteren Belegung abgeleitet hat, berühre man die vordere Belegung, so wird bei Annäherung des Fingers ein schwacher Funken überspringen, ein Beweis, daß hier freie Elektricität vorhanden war. Hat man nun von der vorderen Belegung alle freie + *E* weggenommen, so ist nun wieder auf der anderen Seite freie — *E* und man kann nun von der hinteren Belegung einen schwachen Funken entlocken u. s. w.

Fig. 396.



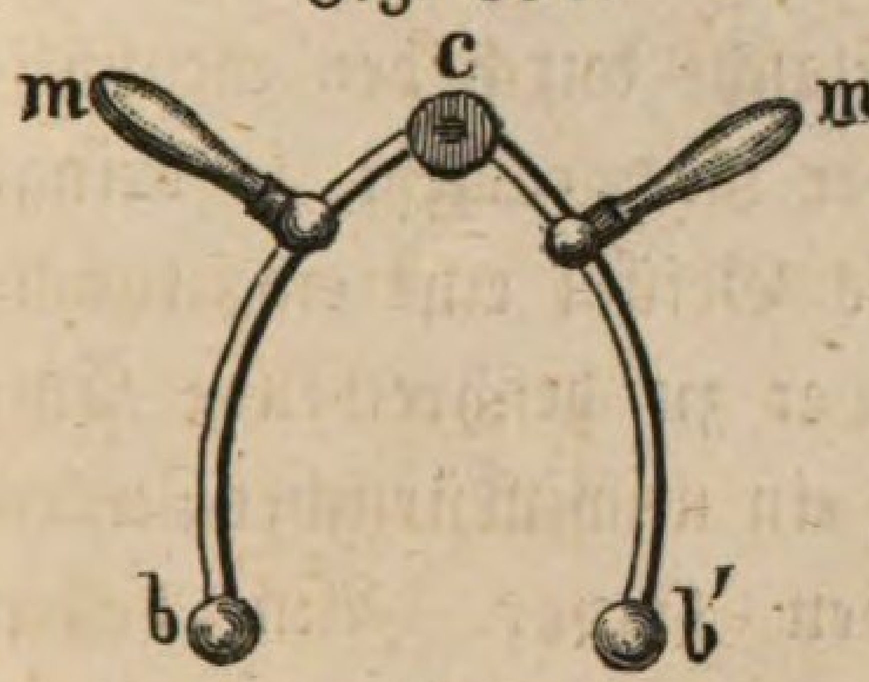
Es läßt sich dieser Ueberschuß an Elektricität, welcher auf der einen Belegung vorhanden seyn muß, um die entgegengesetzte *E* auf der anderen Seite vollständig zu binden, auch dem Auge sichtbar machen. Man befestige mit etwas Wachs auf jeder Seite der Tafel ein leichtes elektrisches Pendel in der Weise, wie man in Fig. 396 sieht, welche die Scheibe im Durchschnitt zeigt. Auf der Seite, auf welcher freie Elektricität sich befindet, wird das Pendel abgestoßen, während es auf der anderen Seite gerade herunterhängt und mit der Belegung in Berührung bleibt. Berührt man die Seite, auf welcher sich freie Elektricität befindet, so fällt das Pendel nieder, während das auf der anderen Seite steigt. Man kann also durch abwechselndes Berühren auf der einen und auf der

anderen Seite abwechselnd das eine und das andere Pendel steigen machen.

Diese Erscheinung mit den Pendeln läßt sich leicht erklären. Wenn auf der einen Seite ein Ueberschuß von $+E$ ist, so wirkt sie anziehend sowohl auf die E der anderen Belegung, als auch auf die wenige Elektricität, die sich etwa im Kügelchen des Pendels befindet. Freilich wirkt die $-E$ der hinteren Belegung abstoßend auf die $-E$ im Kügelchen; aber die Kraft, mit welcher der Ueberschuß der $+E$ das negative Kügelchen anzieht, ist größer als die Kraft der Abstoßung. Leitet man aber die überschüssige $+E$ ab, so verbreitet sich die freigewordene $-E$ zum Theil über das Kügelchen, welches nun abgestoßen wird, weil jetzt kein Ueberschuß von $+E$ auf der anderen Seite mehr vorhanden ist, welcher es zurückhalten könnte.

Dadurch, daß man abwechselnd die eine und dann die andere Belegung mit dem Finger berührt und so immer die freie Elektricität auf der einen Seite wegnimmt, wird allmälig der Apparat ganz entladen. Wenn man aber die beiden Belegungen zugleich berührt, oder sie auf irgend eine andere Weise in leitende Verbindung setzt, so findet die Entladung auf einmal Statt, indem die angehäuften entgegengesetzten Elektricitäten der beiden Belegungen auf diesem Wege zu einander übergehen. Man wendet zu diesem Zwecke gewöhnlich den Fig. 397 dargestellten Entlader an. Er besteht aus zwei gebogenen Messingstäben, bc und $b'c$, welche bei c durch ein Charnier verbunden sind. Jeder der Arme des Ausladers endet mit einer kleinen Messingkugel (b und b') und ist außerdem noch mit einem isolirten Handgriff (m und m') versehen. Man berührt die eine Belegung mit der einen Kugel und nähert die andere Kugel der gegenüberstehenden Belegung. Schon in einiger Entfernung springt ein Funken mit lebhaftem Lichte und lautem Knacken über.

Fig. 397.

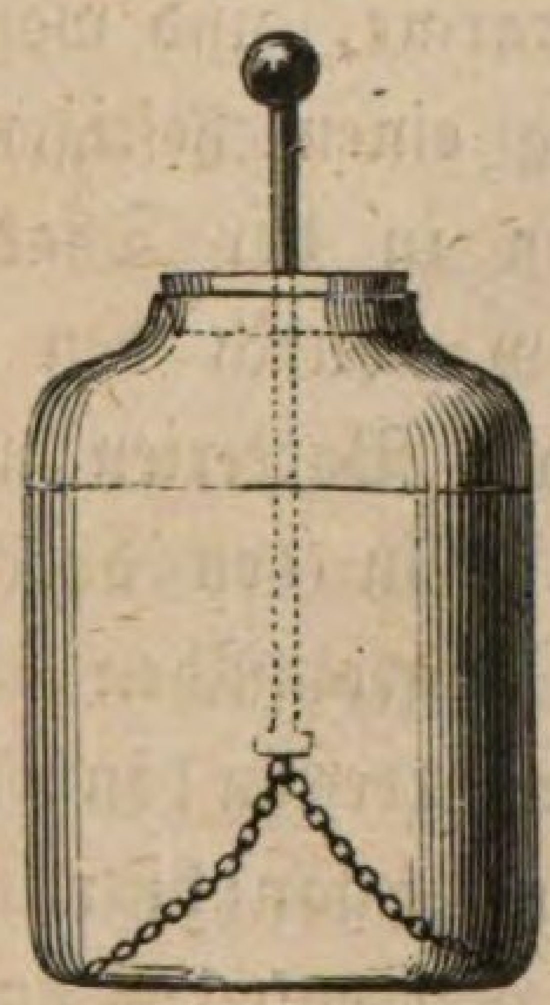


Die Leidner Flasche ist nur eine veränderte Form der Franklin'- 178
schen Tafel; sie besteht aus einem Glasgefäße, welches außen mit Stanniol überklebt ist, welche Belegung bis auf einige Zoll vom Rande hinaufreicht; innen ist das Gefäß auf ähnliche Weise mit einer Belegung versehen oder mit einer leitenden Substanz, etwa Eisenfeile oder Schrotkörnern, gefüllt. Die innere Belegung ist mit einem Messingstabe verbunden, welcher durch den Stopfen oder den Deckel des Gefäßes hindurchgeht und mit einem Knopfe endigt. Fig. 398 und Fig. 399 stellen zwei Formen der Leidner Flasche dar. Der nicht belegte Theil des Glases muß gefirnißt werden. Um die Flasche zu laden, bringt man die äußere

Fig. 398.



Fig. 399.



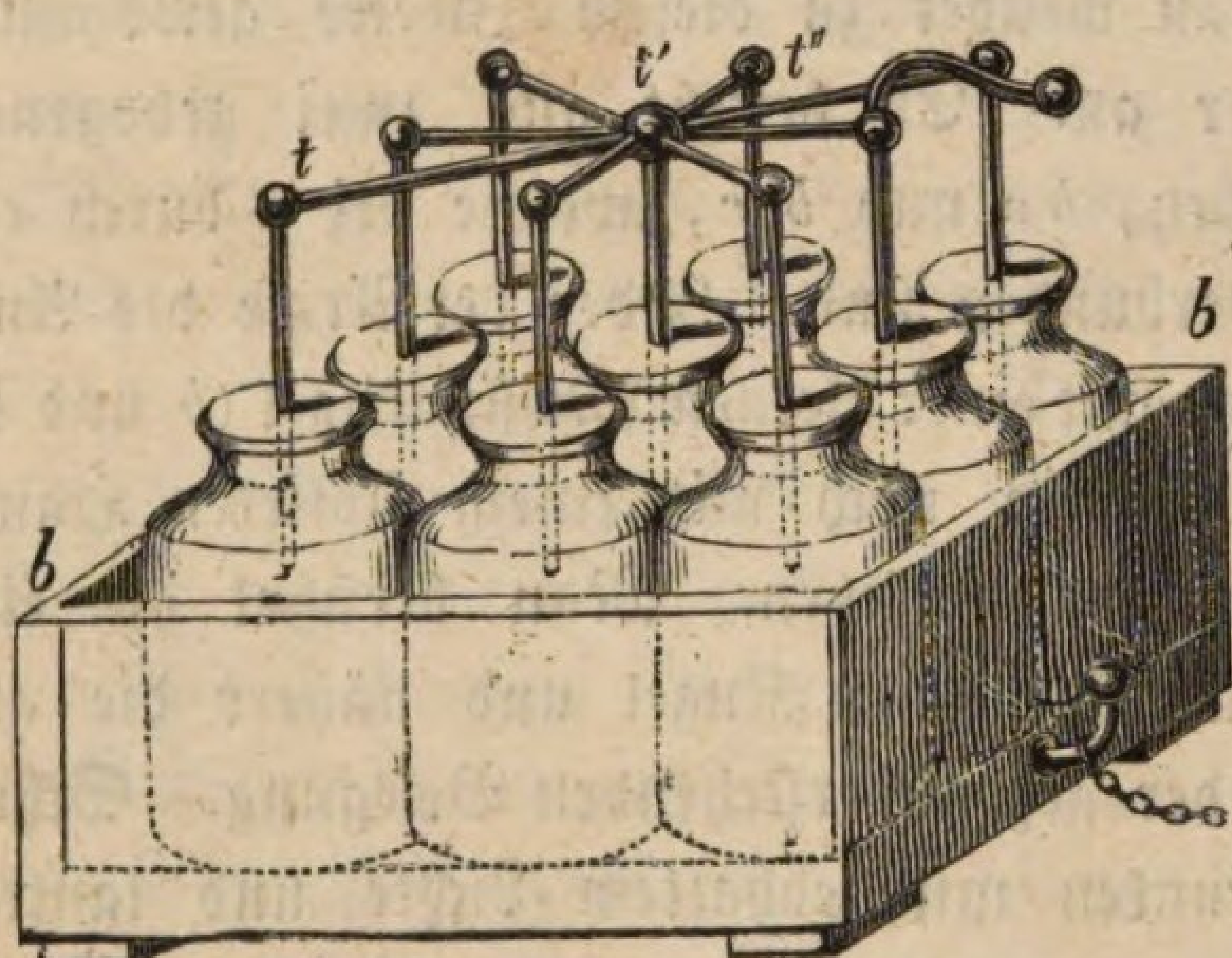
Belegung mit dem Boden, den Knopf mit dem Conductor der Maschine in leitende Verbindung.

Die Leidner Flaschen entladen sich manchmal von selbst, indem entweder ein Funken von der äußeren Belegung zu dem Metallstabe überspringt, oder indem das Glas durchbrochen wird. Im letzteren Falle ist die Flasche natürlich für die Folge unbrauchbar.

Wenn man zur Entladung der Flasche mehrere Leiter zugleich anwendet, so theilt sich der Entladungsschlag im Verhältniß ihrer Leitungsfähigkeit. Drückt man z. B. mit der einen Hand einen Metalldraht an die äußere Belegung, so kann man ungestraft mit der anderen Hand das andere Ende des Drahtes an den Knopf halten; der Entladungsschlag geht durch das Metall und nicht durch den Körper, weil das Metall ungleich besser leitet; der Draht darf jedoch nicht zu dünn seyn.

Um recht starke Ladungen zu erhalten, muß man möglichst große Flaschen nehmen, oder man muß mehrere Flaschen zu einer elektrischen Batterie verbinden. Eine solche Batterie ist Fig. 400 dargestellt. Alle äußeren Belegungen der Flaschen sind unter sich in leitender Verbindung, ebenso alle inneren Belegungen.

Fig. 400.



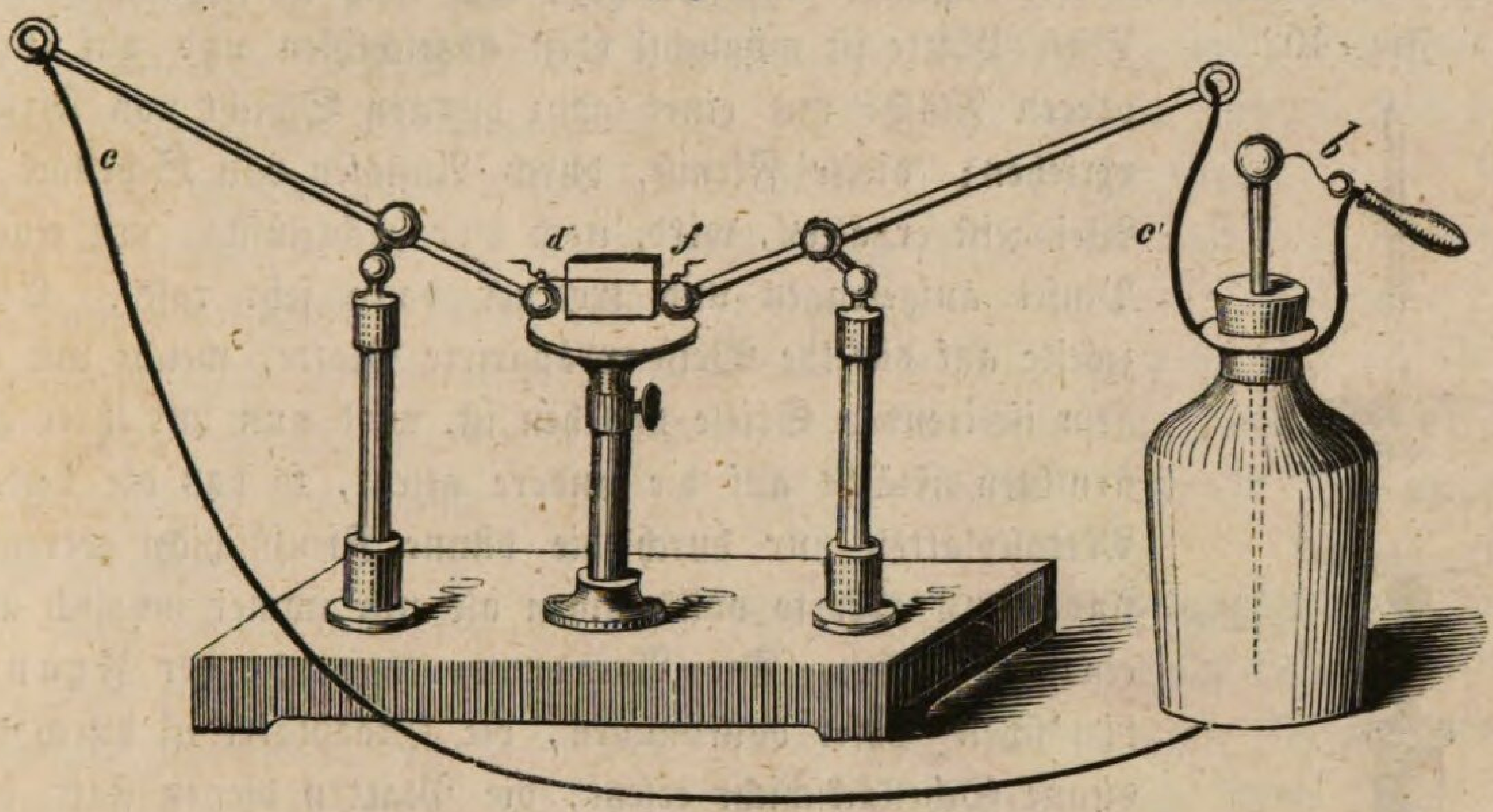
Wenn der Entladungsschlag einer Leidner Flasche durch den menschlichen Körper hindurchgeht, so bringt er auf das Gefühl eine eigenthümliche, schwer zu beschreibende Empfindung, ein unwillkürliches Zucken der Nerven hervor. Am besten macht man den Versuch, wenn man mit einer Hand die äußere Belegung, mit der anderen den Knopf anfaßt. Bei schwächeren Ladungen ist der Schlag nur in den Vorderarmen fühlbar, stärker fühlt man ihn auch im Oberarme, und wenn die Ladung noch stärker gemacht wird, so bringt der Schlag einen heftigen Schmerz in der Brust hervor. Sehr starke Schläge können in der That gefährlich werden. Um kleinere Thiere, wie Vögel, Hasen u. s. w., durch den elektrischen Schlag zu tödten, hat man noch nicht einmal große Batterien nöthig, mit welchen man selbst noch größere Thiere tödten kann. An den durch einen elektrischen Schlag getödteten Thieren hat man bei der anatomischen Untersuchung derselben bis jetzt noch keine Verletzung der Organe entdecken können; nach den Zuckungen aber, welche sie machen, wenn der Schlag nicht ganz hinreichend war, um sie zu tödten, kann man beurtheilen, wie heftig das Nervensystem angegriffen worden ist.

Wenn mehrere Personen eine Kette bilden, indem sie einander die Hände geben, und die erste die äußere Belegung der Flasche, die letzte den Knopf anfaßt, so fühlen alle den Schlag auf einmal.

Brennbare Flüssigkeiten kann man mit Hülfe der Leidner Flasche weit sicherer entzünden als mit dem directen Funken vom Conductor der Maschine. Selbst gepulvertes Kolophonium, welches man auf Baumwolle streut, und Schießpulver kann man mit dem Entladungsfunken der Leidner Flasche entzünden.

Zu sehr vielen Versuchen, die man mit dem Entladungsschlage der Leidner Flasche und der elektrischen Batterie anstellen kann, ist der Henley'sche allgemeine Auslader, welcher Fig. 401 dargestellt ist, ganz besonders

Fig. 401.



bequem. Der eine Arm ist durch die Kette *c* mit der äußeren Belegung in leitender Verbindung, an dem anderen Arme ist eine Kette *c'* befestigt, welche mit der isolirten Kugel *b* endigt. Wenn der Funken durchschlagen soll, so faßt man die isolirende Handhabe der Kugel *b* und nähert sie rasch dem Knopfe der Flasche. Der Funken schlägt bei *b* und zwischen den beiden Kugeln *d* und *f* über, welche auf einem isolirenden Tischchen aufliegen.

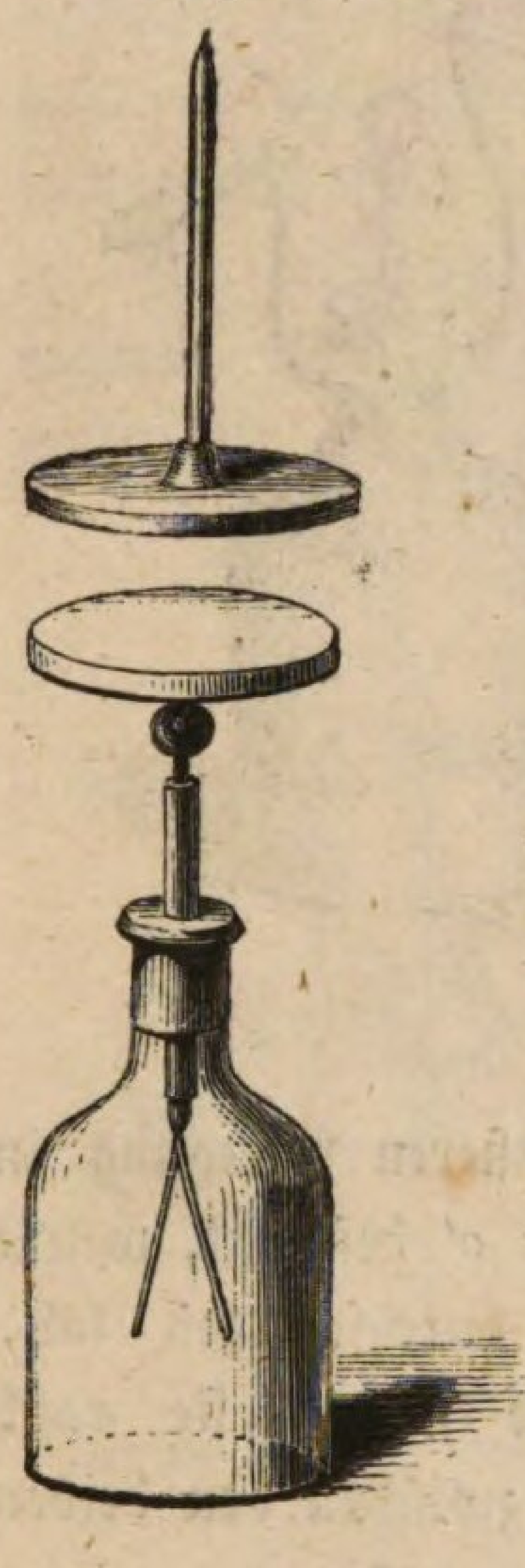
Wenn man die Kugeln *d* und *f* durch einen sehr dünnen Eisendraht verbindet, so wird dieser erwärmt, wenn ein schwacher Schlag hindurchgeht; eine stärkere Ladung macht ihn rothglühend, und eine noch stärkere macht, daß er in einzelnen geschmolzenen Kügelchen auseinanderfährt, die weithin fortgeschleudert werden.

Schlechte Leiter, welche den Weg des Entladungsschlages unterbrechen, werden, wenn die Anhäufung der Elektricität bedeutend genug ist, zertrümmert oder durchlöchert. Eine Holzscheibe z. B., welche 3 bis 4 Zoll Durchmesser hat und 3 bis 5 Linien dick ist, wird von dem Entladungsschlage durchbohrt. Ebenso ein oder mehrere Kartenblätter, Pappendeckel u. s. w. Um den Versuch zu machen, bringt man den zu durchlöchernden Körper zwischen die beiden Kugeln des Henley'schen Entladers und zwar so, daß diese Kugeln den geschobenen Körper berühren.

Der Condensator. Eigentlich ist jeder Apparat ein Condensator, ein- 179

welchem gebundene Elektricität angehäuft wird, also auch die Franklin'sche Tafel und die Leidner Flasche. Man wendet jedoch diese Benennung nur für solche Apparate an, welche dazu dienen, Elektricität von sehr geringer Spannung durch Verdichtung merklich zu machen. Im Wesentlichen bestehen alle Condensatoren aus zwei leitenden Platten, welche durch eine nichtleitende Schicht getrennt sind. Indem wir die unvollkommneren Instrumente der Art übergehen, soll hier nur von dem Condensator die Rede seyn, wie man ihn in Verbindung mit dem Goldblattelektrometer anwendet. Auf das Goldblattelektrometer wird eine Metallplatte aufgeschraubt, wie man sie Fig. 402 sieht.

Fig. 402.



Diese Platte ist möglichst eben abgeschliffen und auf ihrer oberen Fläche mit einer ganz dünnen Schicht von Firniß versehen; dieser Firniß, durch Auflösen von Schellack in Weingeist erhalten, wird, noch sehr leichtflüssig, mit einem Pinsel aufgetragen und trocknet dann sehr rasch. Eine zweite auf dieselbe Weise präparirte Platte, welche mit einem isolirenden Stiele versehen ist, wird nun mit ihrer gefirnißten Fläche auf die andere gesetzt, so daß die beiden Metallplatten nur durch die dünne Firnißschicht getrennt sind, sonst aber so vollkommen als nur immer möglich auf einander passen. Die Anordnung entspricht der Franklin'schen Tafel vollkommen, die Glasplatte ist durch die dünne Schellackschicht ersetzt, die Platten dienen statt der Belegungen, nur kann man hier die obere Platte nach Belieben abheben, während die beiden Belegungen der Franklin'schen Tafel fest sind. Weil die isolirende Schicht so außerordentlich dünn ist, die Platten also einander sehr nahe sind, so ist hier die Bindung sehr stark. Bringt man die untere Condensatorplatte mit einer schwachen Elektricitätsquelle in Berührung, während man die obere ableitend mit dem Finger berührt, so wird der Condensator ganz auf dieselbe Weise geladen, wie eine Leidner Flasche, deren äußere Belegung nicht isolirt ist, während die innere mit dem Conductor der Maschine in Verbindung steht. Der ganze Unterschied liegt nur darin, daß man ein Mal eine Elektricitätsquelle von großer, das andere Mal eine solche von geringer elektrischer Spannung hat; in beiden Fällen aber findet auf gleiche Weise eine Verdichtung der *E* Statt.

Ist der Condensator geladen, so wird die obere Platte abgehoben (und zwar möglichst vertikal, damit die Berührung beider Platten in allen Punkten in demselben Momente aufgehoben wird); dadurch wird die bis dahin gebundene *E* der unteren Platte frei, sie verbreitet sich über die Goldblättchen und bewirkt ihre Divergenz. Weiter unten, bei der Lehre vom Galvanismus, werden wir zahlreiche Anwendungen dieses Condensators kennen lernen.

Fünftes Kapitel.

Vom elektrischen Lichte, dem elektrischen Geruch und den Bewegungen elektrisirter Körper.

Das elektrische Licht in der Luft und in anderen Gasen un- 180
ter dem Druck der Atmosphäre. Die Schlagweite, auf welche hin man aus einem elektrisirten Körper einen Funken ziehen kann, hängt von der Leitfähigkeit der Substanz, von der Größe ihrer Oberfläche und von der Stärke der elektrischen Ladung ab. Aus eckigen Körpern und aus Spitzen strömt die Elektricität von selbst, schon bei ganz schwacher Spannung, aus, und man beobachtet dabei im Dunkeln glänzende Lichtbüschel, die oft mehrere Zoll lang sind. Bei runden Körpern sind schon sehr starke Ladungen nöthig, wenn Büschel hervorsprühen sollen; wenn man ihnen aber einen mit dem Boden in Verbindung stehenden Leiter nähert, so springen Funken, nach Umständen selbst auf große Entfernungen über, die dann einen dem Blitz ähnlichen Zickzack bilden.

Um die Funken zu vervielfältigen, muß man den Leiter, durch welchen die Elektricität in den Boden überströmt, oft unterbrechen; darauf beruhen mehrere Spielereien.

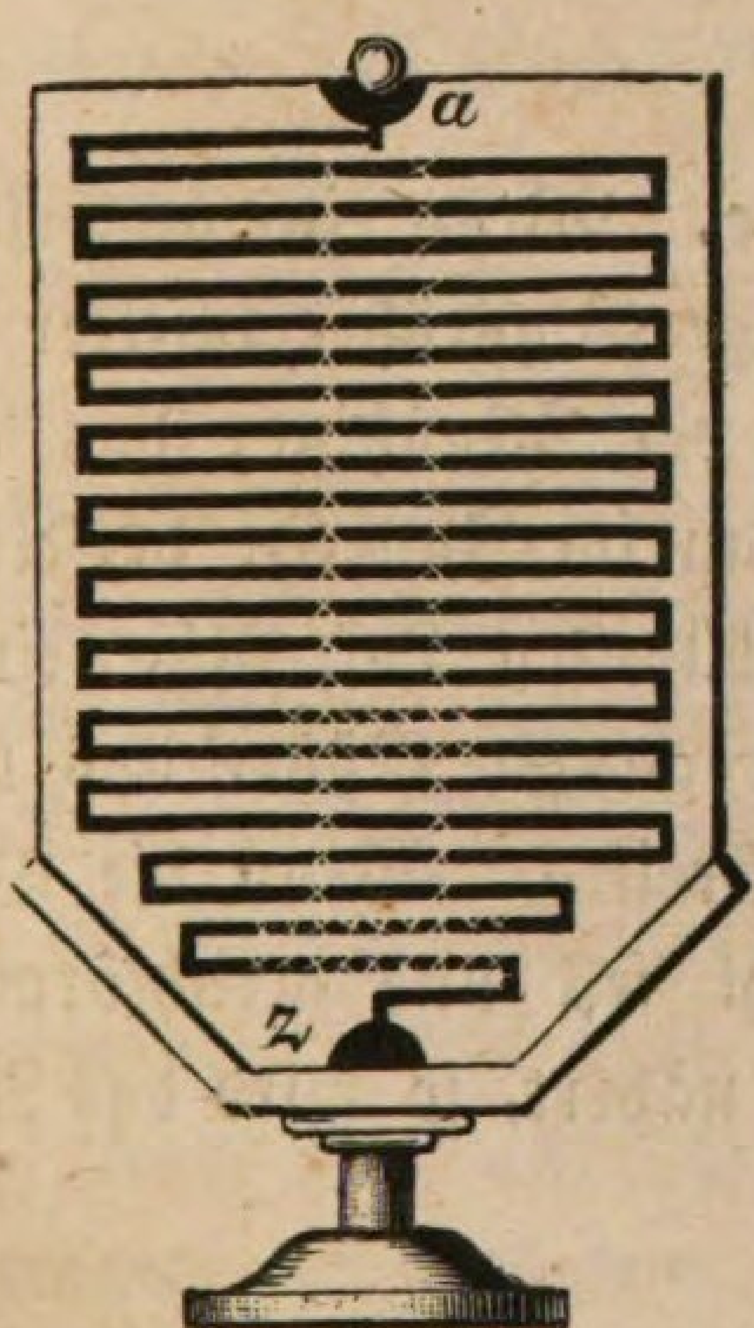
Mit Metallperlen, die auf einen Seidenfaden aufgereiht sind, jedoch so, daß jede Perle von der folgenden durch Knoten mehrere Millimeter weit entfernt gehalten wird, kann man Namenszüge und allerlei Figuren bilden, welche so lange leuchten, als man die Maschine dreht, von deren Conductor die Elektricität durch diese Kette in den Boden strömt.

Blitzröhren sind Glasröhren, auf welchen man rautenförmige Stanniolblättchen so aufgeklebt hat, daß ihre einander zugekehrten Spitzen etwa so nahe stehen, wie man Fig. 403 sieht. Gewöhnlich klebt man sie so auf, daß sie eine um die Röhre laufende Schraubenlinie bilden. Wenn man, das eine Ende einer solchen Röhre in der Hand haltend, das andere an den Conductor der Maschine bringt, während sie gedreht wird, so sieht man im Dunkeln fortwährend zwischen je zwei Rauten Funken überspringen, so daß eine fast zusammenhängende Lichtlinie auf der Röhre erscheint.

Fig. 403.



Fig. 404.



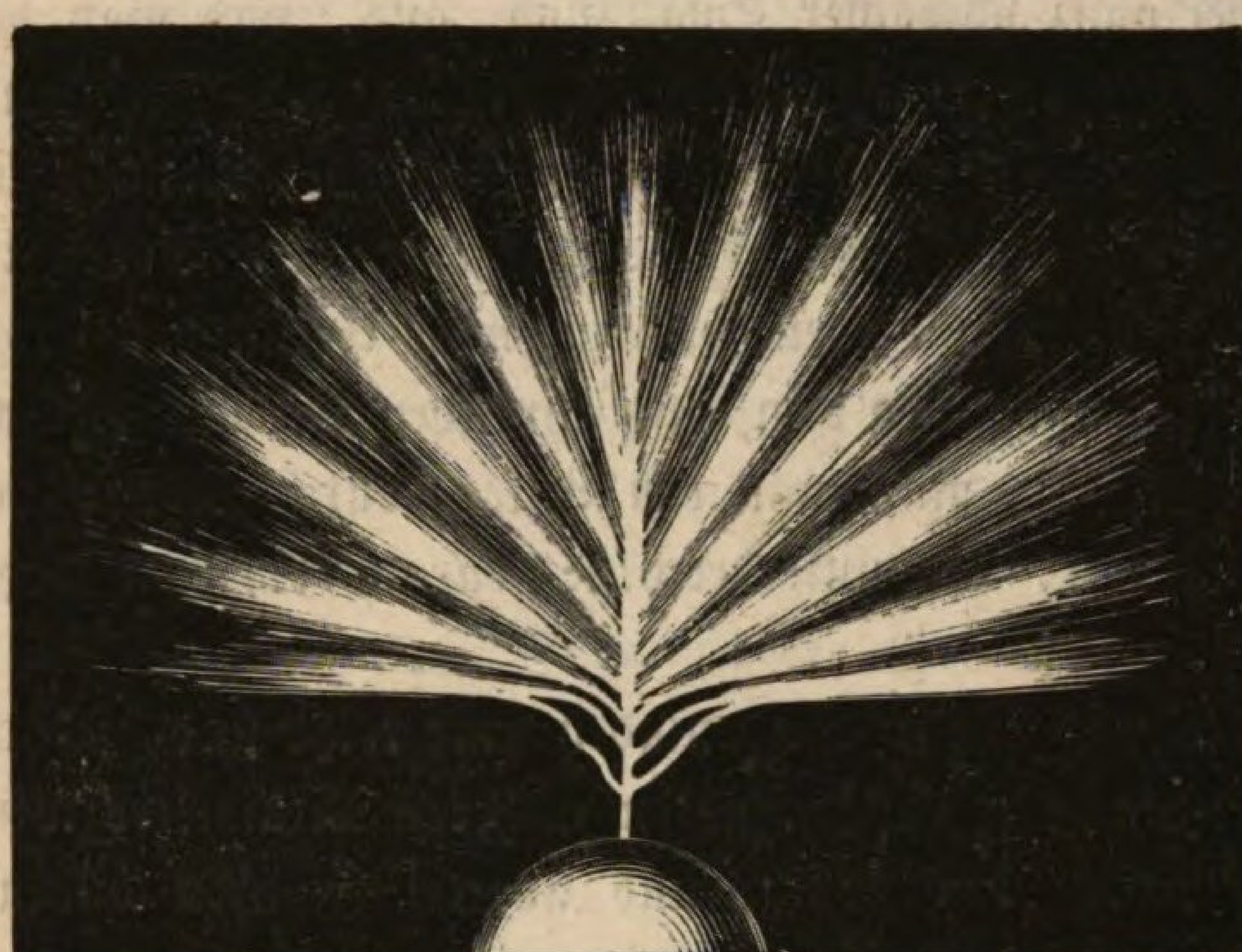
Eine Blitztafel ist Fig. 404 dargestellt. Auf einer Glastafel ist eine Reihe von Stanniolstreifen aufgeklebt, wie man es in der Figur sieht, so daß von *a* bis *z* eine metallische Leitung ginge, wenn sie nicht an den mit >< bezeichneten Stellen unterbrochen wäre. Wenn man nun *z* mit der äußeren Belegung einer Leidner Flasche in Verbindung bringt und dann eine leitende Verbindung zwischen *a* und

dem Knopfe der Flasche herstellt, so springen gleichzeitig an den Unterbrechungsstellen Funken über. Man kann auf diese Weise Namenszüge und allerlei Figuren darstellen.

Man hat diese Spielereien noch auf mannigfache Weise abgeändert; diese Beispiele mögen jedoch genügen.

Der Lichtbüschel, welchen man im Dunkeln beobachtet, wenn man auf den Conductor der Elektrisirmaschine eine Spitze aufsetzt, von welcher die Elektricität ausströmt, ist in Fig. 405 dargestellt. Die negative (Harz-) Elektricität giebt niemals so divergente und große Lichtbüschel wie die positive. Dieses merkwürdige Phänomen ist sehr beachtungswerth, weil es einen unterscheidenden Charakter der beiden elektrischen Flüssigkeiten darzubieten scheint.

Fig. 405.



Wenn man eine Metallspitze in die Hand nimmt und sie dem Conductor der Maschine nähert, so beobachtet man auch den Lichtbüschel.

In verdichteter atmosphärischer Luft ist der Funken einer Elektrisirmaschine sehr lebhaft, in Kohlensäuregas weiß und intensiv, in Wasserstoffgas roth und schwach, in Wasserdampf gelb, in Alkohol und Aetherdampf apfelgrün.

Die Lichterscheinungen der Maschinenelektricität sind eine treue, wenn auch schwache Nachbildung der elektrischen Lufterscheinungen, welche man bei Gewittern beobachtet.

181 **Elektrisches Licht im verdünnten Raume.** Wenn eine an beiden Enden mit Metallfassungen versehene mehrere Fuß lange Glasröhre luftleer gemacht ist und man das eine Ende mit dem Conductor der Maschine, das andere mit dem Boden in Verbindung setzt, so sieht man im Inneren derselben ein lebhaftes Leuchten. Da die Elektricität in der verdünnten Luft nur einen schwachen Widerstand findet, so breitet sie sich in der ganzen Röhre aus und bezeichnet den Weg, den sie zurücklegt, durch Feuerstreifen. Wenn die Verbindung gehörig unterhalten wird, so erscheint das Licht fest und gleichförmig; wenn man aber von außen her einen leitenden Körper nähert, so wird das Licht nach dieser Seite hingezogen und wird zugleich heller.

Man nimmt zu diesem Versuche gewöhnlich gerade, mehrere Zoll weite

Glasröhren. Eine etwas andere Form dieses Apparates ist Fig. 406 dargestellt, das Glasgefäß ist nämlich von elliptischer Form. An beiden Enden sind Metallfassungen angebracht; die Fassung auf der einen Seite ist mit einem Hahn versehen und kann auf eine Luftpumpe aufgeschraubt werden. Die Fassung der anderen Seite ist mit einer Lederbüchse versehen, durch welche der mit dem Knopfe *b'* endigende Messingdraht hindurchgeht, so daß man den Knopf *b'* nach Belieben dem Knopfe *b* nähern kann. Wenn man den Apparat möglichst luftleer gemacht hat, so strömt die Elektricität leicht über und erfüllt das ganze Gefäß mit Licht. Wenn man durch den Hahn etwas Luft einströmen läßt, so wird das Licht weniger diffus und bildet purpurfarbene Lichtbogen zwischen *b* und *b'*. Je mehr Luft man einläßt, desto mehr nimmt die Ausdehnung der Lichterscheinung ab; sie nähert sich mehr und mehr der Form des gewöhnlichen elektrischen Funkens.

Fig. 406.

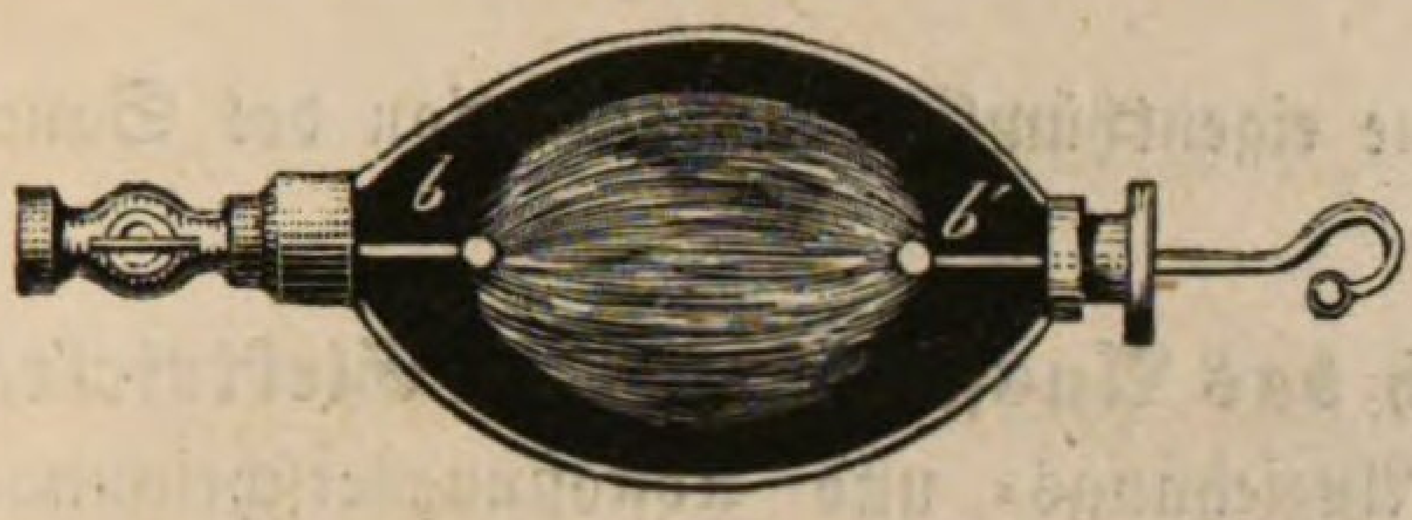
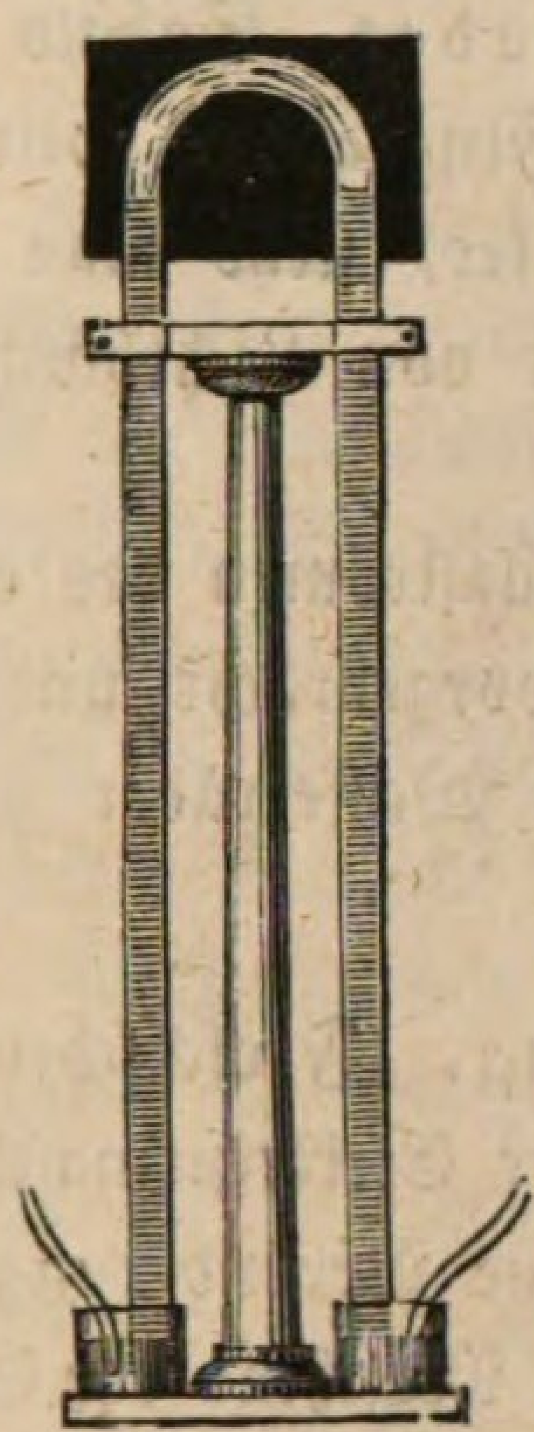


Fig. 407.



Auch die Toricelli'sche Leere durchströmt die Elektricität mit Lichterscheinung.

Picard bemerkte zuerst, daß ein Barometer im Dunkeln leuchtet, wenn das Quecksilber auf und nieder schwankt, und bald überzeugte man sich, daß diese Erscheinung von der durch die Reibung des Quecksilbers an den Wänden der Röhre entwickelten Elektricität herrühre. Um das elektrische Licht in der Toricelli'schen Leere zu beobachten, construirte Cavendish das Fig. 407 dargestellte Doppelbarometer, dessen Anwendung wohl ohne weitere Erklärung verständlich ist.

Der elektrische Geruch. Wenn aus irgend einer Hervorragung am 182
Conductor der Elektrisirmaschine die Elektricität ausströmt, so bemerkt man einen eigenthümlichen Geruch, den man den elektrischen Geruch nennt. Dieser Geruch rührt von einem eigenthümlichen Gase, dem Ozon her, welches sich unter dem Einfluß der Elektricität bildet, und welches in seinem Verhalten viele Aehnlichkeit mit Chlor hat; es zersetzt z. B. wie das Chlor das Jodkalium; hält man gegen eine am Conductor der Maschine befindliche Spitze, welche einen Büschel und mit ihm den elektrischen Geruch giebt, ein Stück Papier, welches mit Jodkaliumkleister (Stärkekleister mit etwas Jodkalium) bestrichen ist, so wird der Kleister blau gefärbt, indem unter dem Einfluß des Ozons das Jodkalium zersetzt wird und das frei werdende Jod die Stärke blau färbt.

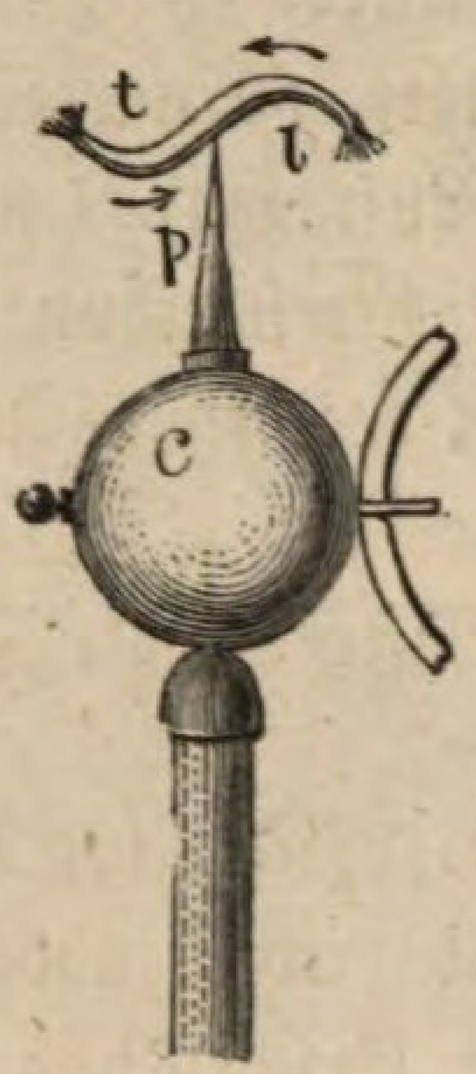
Auch ohne alle Elektricität auf rein chemischem Wege läßt sich das Ozon erzeugen. Bringt man ein Stückchen Phosphor in ein Arzneiglas, in welchem sich so viel Wasser befindet, daß das Phosphorstück zur Hälfte herausragt, so

zeigt die in der Flasche befindliche Luft nach einiger Zeit einen höchst intensiven Ozongeruch; hängt man einen Papierstreifen mit Jodkaliumkleister in die Flasche, so wird der Kleister blau.

Wahrscheinlich ist das Ozon eine eigenthümliche Modification des Sauerstoffs.

183 **Bewegungen, welche durch das Ausströmen von Elektricität hervorgebracht werden.** Die Anziehungs- und Abstoßungserscheinungen sind bereits besprochen worden; es bleiben hier nur noch einige andere durch die Elektricität bewirkte Bewegungen zu betrachten. Auf eine leitende Spitze *cp*, Fig. 408, welche mit dem Conductor der Maschine in Verbindung steht, ist ein an beiden Enden nach entgegengesetzten Richtungen umgebogenes und zugespitztes Metallstäbchen *tt'* so aufgesetzt, daß es sich im Gleichgewicht befindet, aber sich leicht auf der Spitze in horizontaler Ebene umdrehen läßt. Ein solcher Apparat führt den Namen eines elektrischen Flugrades. Sobald die Maschine gedreht wird, beginnt das Flugrad zu rotiren, und wenn man es im Dunkeln beobachtet, sieht man an den Spitzen die Elektricität in Gestalt von Lichtbüscheln ausströmen.

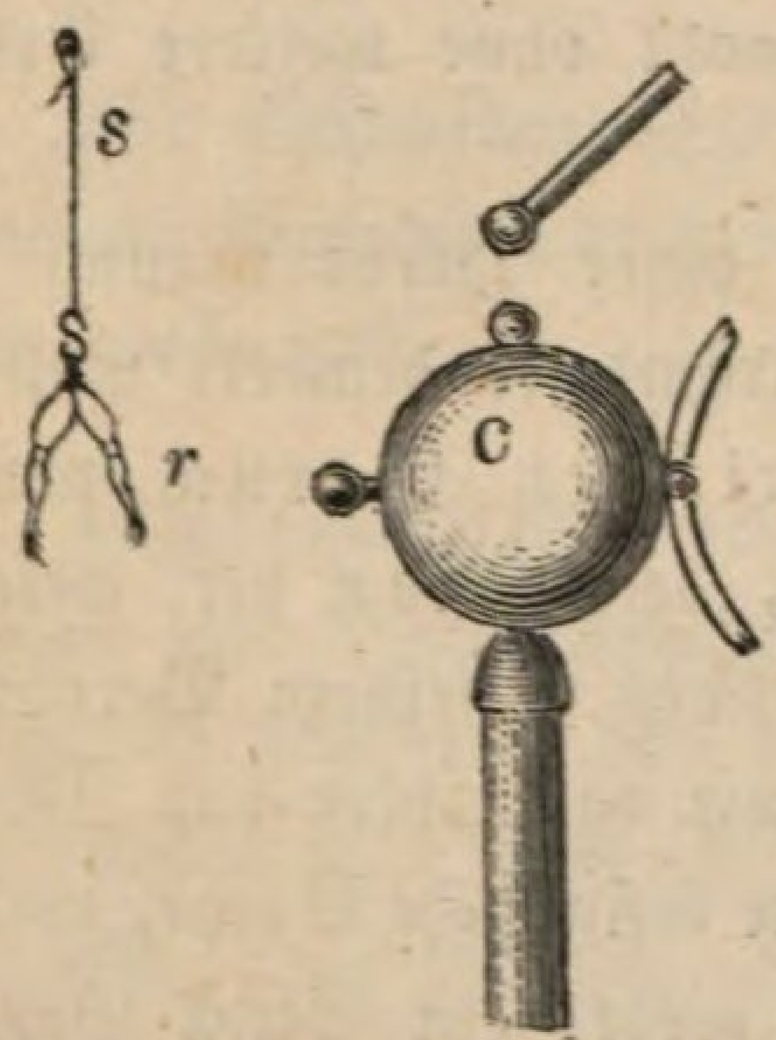
Fig. 408.



Diese Bewegung wird durch das Ausströmen des elektrischen Fluidums aus den Spitzen hervorgebracht und ist eine der Umdrehung der Segner'schen Wasserräder ganz entsprechende Erscheinung.

184 **Bewegungen durch den elektrischen Rückschlag.** Froschschenkel, die, wie Fig. 409 zeigt, in der Nähe des Conductors einer Elektrisirmaschine aufgehängt sind, scheinen gar keine Veränderung zu erleiden, wenn durch Drehen der Maschine der Conductor *c* mit $+E$ geladen wird; ein solcher Froschschenkel aber wird durch Vertheilung geladen, wenn er an einer leitenden Schnur aufgehängt ist. Sobald man nun aus dem Conductor *c* einen Funken zieht, bringt die plötzliche Wiedervereinigung der Elektricitäten in dem Froschschenkel Zuckungen hervor: ein Beweis, daß bei der Rückkehr in den natürlichen Zustand die Moleküle durch den Druck der elektrischen Flüssigkeiten afficirt werden, welche sich wieder zu vereinigen streben. Diese Wirkungen werden mit dem Namen des Rückschlags bezeichnet. Mit einem Frosche, welcher schon 5 bis 6 Stunden getödtet ist, würde man den Versuch vergebens anstellen, er gelingt aber sehr gut mit einem eben getödteten oder noch besser mit einem noch lebenden.

Fig. 409.



In der Nähe einer kräftigen Maschine empfindet auch ein Mensch, der mit dem Boden in leitender Verbindung steht, ähnliche Schläge. Ebenso wirken

auch die Entladungen der Gewitterwolken; sie können nämlich durch einen directen Schlag und durch den Rückschlag wirken.

Dritte Abtheilung.

Vom Galvanismus.

Erstes Kapitel.

Von der Berührungselektricität und der galvanischen Kette.

Im Jahre 1789 machte Galvani zu Bologna eine Entdeckung, durch 185
welche ein ganz neues Feld für die Physik eröffnet wurde. Diese Entdeckung war die Beobachtung der scheinbar unbedeutenden Thatsache, daß frisch präparirte Froschschenkel, mittelst kupferner Häkchen an einem eisernen Balkongeländer aufgehangen, in Zuckungen geriethen, so oft die Schenkelmuskel durch den Wind mit dem eisernen Geländer in Berührung gebracht wurden. Das kupferne Häkchen war mit den Schenkelnerven in Berührung.

Man glaubte anfangs, diese Erscheinung durch eine Art Nerven-Flüssigkeit erklären zu können, welche dem elektrischen Fluidum ähnlich seyn sollte; man dachte sich den organischen Körper in Beziehung auf diese Flüssigkeit ungefähr wie eine Leidner Flasche, deren Belegungen einerseits die Nerven, andererseits die Muskeln sind. Eine Entladung sollte stattfinden, sobald Nerven und Muskeln in leitende Verbindung gebracht werden, was bei dem Versuche Galvani's durch die Kupferhäkchen und das eiserne Geländer der Fall war.

Alexander Volta wiederholte Galvani's Versuche mit unermüdlicher Aufmerksamkeit und fand bald, daß ein zum Gelingen des Versuches sehr wichtiger Umstand bis dahin ganz übersehen worden war. Um nämlich eine starke Wirkung zu haben, ist es durchaus nöthig, daß der Leitungsbogen, welcher die Nerven und Muskeln verbindet, aus zwei verschiedenen Metallen besteht, welche mit einander in Berührung sind.

Den Galvani'schen Fundamentalversuch kann man leicht in folgender Weise anstellen: Man präparire den Unterschenkel des frisch getödteten und enthäuteten Frosches so, daß noch ein möglichst großes Stück des zum großen Wadenmuskel führenden Nerven daran bleibt, wie Fig. 410 (s. f. S.) zeigt. Legt man dieses Präparat auf eine Glasplatte, berührt man dann das Muskelfleisch mit einem Streifchen Zinkblech, den Nerven mit einem Stück Kupferdraht, so zuckt der Schenkel, sobald man die beiden Metalle in Berührung bringt.

Volta behauptete nun, daß der Froschschenkel nicht wie eine Leidner Flasche zu betrachten sey; daß die hier wirkende Elektricität weder in den Nerven

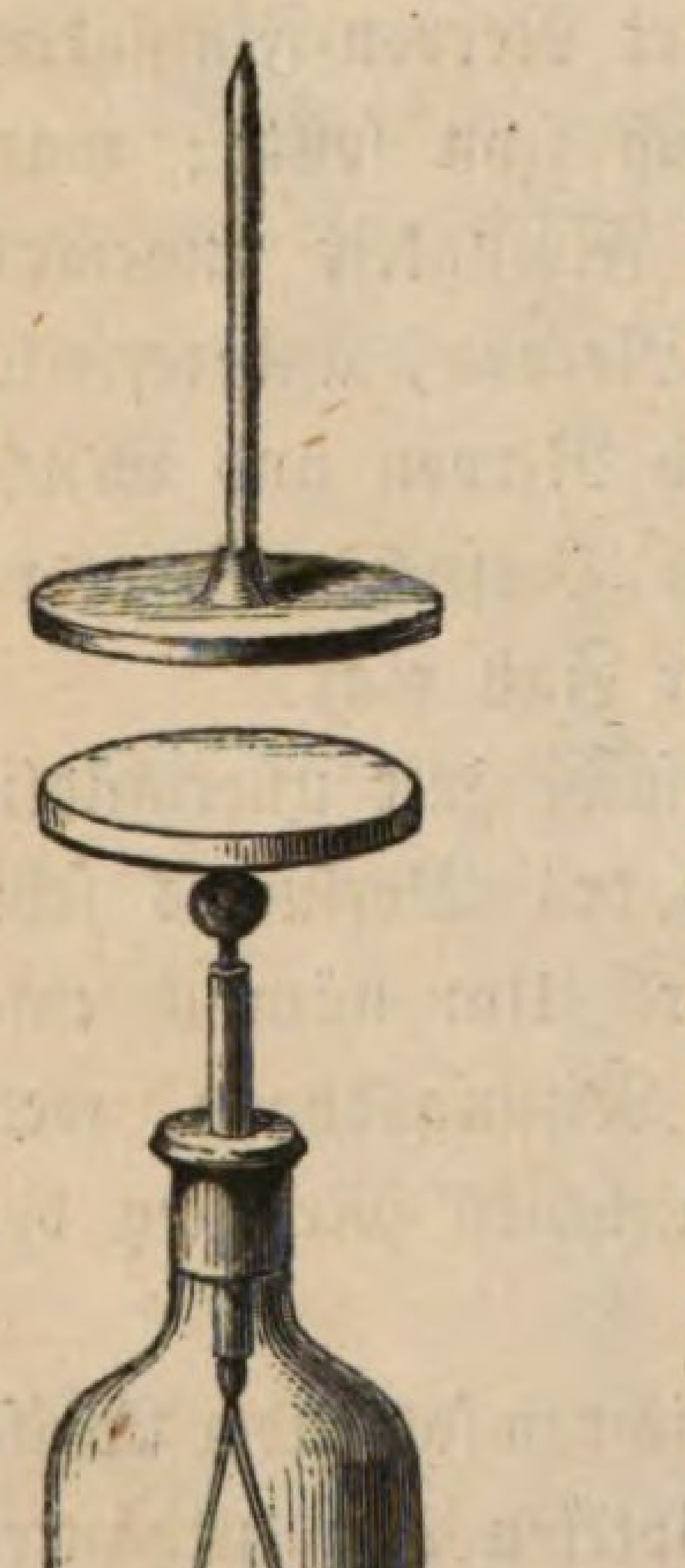
Fig. 410.



noch in den Muskeln, sondern durch die Berührung der beiden Metalle entwickelt werde und daß sie mit dem gewöhnlichen elektrischen Fluidum vollkommen identisch sey. Volta's Ansichten wurden von Galvani und seinen Anhängern bekämpft, jede Partei suchte die Richtigkeit ihrer Theorie durch neue Versuche zu bekräftigen, endlich war es aber doch Volta's Meinung, welche die Oberhand behielt.

186 **Directe Beweise für die Elektricitätsentwickelung durch Berührung verschiedener Metalle.** Die Idee, daß durch die bloße Berührung heterogener Körper Elektricität entwickelt werde, fand nur nach und nach Glauben; die Strenge der Wissenschaft verlangte directe und entscheidende Beweise, welche Volta auch bald gab. Diesen directen Beweis führte er mit Hülfe eines Apparates, den er selbst erst einige Jahre früher erfunden hatte, nämlich mit Hülfe des Condensators, den wir schon oben kennen gelernt haben.

Fig. 411.



Der Versuch wird auf folgende Weise angestellt. Nachdem man sich überzeugt hat, daß der auf das Goldblattelektrometer, Fig. 411, geschraubte Condensator seine Ladung gut hält, und nachdem man ihn wieder in seinen natürlichen Zustand versetzt hat, setzt man die obere Platte durch Berührung mit dem Finger mit dem Boden in leitende Verbindung, während man die untere Platte mit einem Stücke Zink berührt, welches dadurch, daß man es in der anderen Hand hält, auch mit dem Boden in leitender Verbindung steht. Es versteht sich von selbst, daß die Oberflächen der Condensatorplatten da, wo sie nicht mit einander in Berühruug stehen, nicht gefirnißt seyn dürfen, denn sonst wäre ja keine metallische Berührung zwischen Zink und dem Messing (welches sich fast ganz so wie reines Kupfer verhält) der einen Condensatorplatte möglich. Zieht man nun, nachdem die Berührung nur einen Augenblick gedauert hat, den Finger von der oberen, das Zink von der unteren Platte zurück, hebt man darauf die obere Condensatorplatte ab, so erhält man eine merkliche Divergenz der Goldblättchen, und zwar divergiren sie mit negativer Elektricität. Woher kommt diese Elektricität? Sie

kann offenbar nur durch die Berührung des Zinks mit dem Messing der unteren Condensatorplatte erzeugt worden seyn; an der Berührungsstelle ist es, wo eine besondere Kraft wirkt, um die elektrischen Fluida zu trennen und in Bewegung zu setzen; die positive Elektricität geht auf das Zink und von da in den Boden über, die negative hingegen wird auf die untere messingene oder kupferne Condensatorplatte getrieben und auf derselben gebunden, indem sie vertheilend auf die obere Platte wirkt. Wird nun die obere Platte abgehoben, so kann sich die in der unteren Platte gebundene — *E* frei verbreiten und die Divergenz der Goldblättchen bewirken.

Wenn man den Versuch in der Weise wiederholt, daß man die obere Condensatorplatte mit dem Zink, die untere mit dem Finger berührt, so divergiren die Goldblättchen mit positiver Elektricität.

Ist die mit dem Zink berührte Condensatorplatte von Kupfer, so ist die Wirkung kräftiger; sie ist noch weit stärker, wenn sie von Silber oder Gold ist, oder auch wenn nur diese Condensatorplatte ringsum gut versilbert oder vergoldet ist.

Man hat den Volta'schen Fundamentalversuch auf mannigfache Weise abgeändert; wir wollen nur noch eine Form desselben betrachten. Eine Zinkplatte und eine Kupferplatte, deren jede mit einem isolirenden Glasstiel versehen ist, wie die obere Platte eines Condensators, werden mit ihren vollkommen ebenen und metallischen Flächen in Berührung gebracht und dann möglichst gerade von einander abgehoben. Die Zinkplatte ist jetzt positiv, die Kupferplatte ist negativ elektrisch. Man berührt nun die eine Platte eines auf ein Goldblattelektroskop geschraubten Condensators mit der Kupferplatte, die andere mit der Zinkplatte; hat man dies 8 bis 10 Mal wiederholt, so ist der Condensator stark genug geladen, um nach dem Abheben der oberen Condensatorplatte eine starke Divergenz der Goldblättchen zu bewirken.

Bei Anwendung eines recht empfindlichen Elektroskops kann man selbst den Condensator ganz entbehren. Man schraube statt der einen Condensatorplatte eine oben vollkommen ebene nicht gefirnißte Kupferplatte auf und setze auf diese eine ebenfalls nicht gefirnißte an einen Glasstab angeschraubte Zinkplatte. Sobald man die Zinkplatte abhebt, beobachtet man eine schwache Divergenz der Goldblättchen, welche wächst, wenn man die Zinkplatte ableitend berührt, abermals auf die Kupferplatte aufsetzt, abhebt und so fort die Operation mehrmals wiederholt.

Dieser Versuch beweist nicht allein die bei der Berührung von Kupfer und Zink stattfindende Elektricitätserregung, sondern auch, daß die größte Menge der entwickelten Elektricität an den Berührungsflächen beider Metalle gebunden bleibt, daß sich nur ein verhältnißmäßig kleiner Theil frei über den Metallplatten verbreitet; denn der Ausschlag erfolgt ja erst beim Abheben der anderen Platte.

Eine solche Elektricitätserregung tritt nun fast überall da ein, wo sich heterogene Stoffe berühren, nur läßt sie sich bei Metallen am entschiedensten nach-

weisen. Die unbekannte Ursache dieser Elektricitätsentwickelung durch Berührung verschiedenartiger Körper führt den Namen der elektromotorischen Kraft.

187 **Die Spannungsreihe.** Die Stärke der Elektricitätserregung ändert sich, je nach der Natur der Körper, welche mit einander in Berührung gebracht werden. Die Metalle sind gute Elektromotoren; man beobachtet jedoch in dieser Hinsicht einen großen Unterschied unter denselben. So wird z. B. Zink, in Berührung mit Platin, stärker positiv elektrisch als in Berührung mit Kupfer; das Kupfer wird, in Berührung mit Zink, negativ, in Berührung mit Platin positiv elektrisch. Die folgende Tabelle enthält eine Reihe von Körpern, so geordnet, daß jeder der vorangehenden, in Berührung mit allen folgenden, positiv elektrisch wird.

+
Zink
Blei
Zinn
Eisen
Kupfer
Silber
Gold
Platin
Kohle
—

Die elektrische Differenz zwischen Zink und Kupfer und die elektrische Differenz zwischen Kupfer und Platin sind zusammen der elektrischen Differenz zwischen Zink und Platin gleich, d. h. wenn man auf eine Zinkplatte eine Kupferplatte und auf diese eine Platinplatte legt, so sind die elektrischen Spannungen der Endplatten gerade so groß, als ob man die Platinplatte und die Zinkplatte direct auf einander gelegt hätte.

Alle Körper der obigen Reihe zeigen dasselbe Verhalten; denn wenn man drei Metalle auf einander schichtet, so ist die elektrische Spannung der Endplatten stets dieselbe, als ob sie sich unmittelbar berührten und die Zwischenplatten fehlten.

Dasselbe gilt auch von vier, fünf, von beliebig vielen Metallplatten, die man auf einander schichtet; die Spannung der Endplatten ist dieselbe, als ob alle Zwischenplatten fehlten.

Alle Metalle nehmen eine bestimmte Stellung in der Spannungsreihe ein; die Kohle verhält sich in dieser Hinsicht ganz wie ein Metall, sie ist noch mehr elektronegativ als Platin. Auch viele zusammengesetzte Körper nehmen eine bestimmte Stellung in der Spannungsreihe ein, z. B. Braunstein, Eisenoxyd, Schwefeleisen, Schwefelblei u. s. w.; andere zusammengesetzte Körper aber, na-

mentlich Flüssigkeiten, gehorchen den Gesetzen der Spannungsreihe durchaus nicht.

So wird z. B. Zink, in Berührung mit reinem Wasser, negativ elektrisch. Wenn nun das Wasser in die Spannungsreihe eingeschaltet werden sollte, so müßte man es nach seinem Verhalten gegen Zink noch über dieses Metall setzen. Nähme das Wasser wirklich diese Stelle in der Spannungsreihe ein, so müßte Platin in Berührung mit Wasser bei weitem stärker negativ erregt werden als Zink. Die Erfahrung zeigt aber das Gegentheil, das Platin wird, in Berührung mit Wasser, weit weniger negativ als Zink; man sieht also, daß das Wasser ein Körper ist, welcher den Gesetzen der Spannungsreihe nicht gehorcht. Ein ähnliches Verhalten zeigt die verdünnte Schwefelsäure, sie erregt Zink und Kupfer negativ, allein diese negative Erregung ist beim Zink stärker als beim Kupfer; Platin und Gold werden durch verdünnte Schwefelsäure positiv erregt.

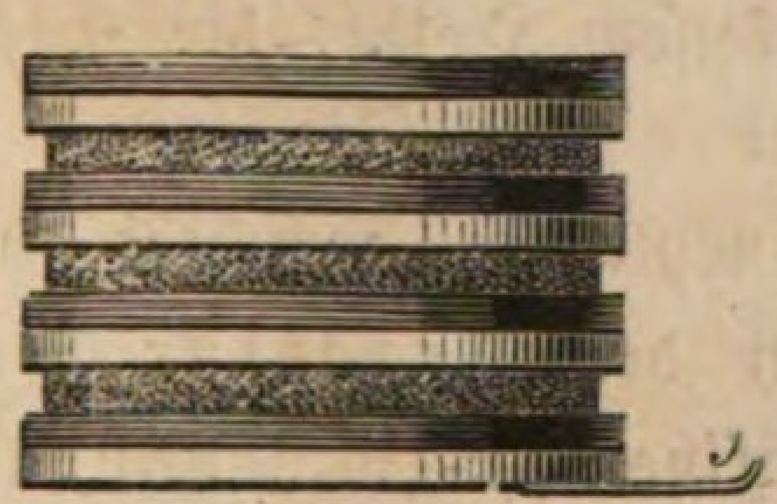
Dieses eigenthümliche Verhalten vieler Flüssigkeiten, daß sie nämlich nicht in die Spannungsreihe passen, macht es möglich, daß man durch Schichtung von Metallplatten in feuchten Leitern, wie dies bei der Volta'schen Säule der Fall ist, eine stärkere elektrische Spannung hervorbringen kann, als die, welche durch zwei sich berührende Metallplatten erzeugt wird.

Construction der Volta'schen Säule. Zum Aufbau der Volta'- 188
schen Säulen werden drei verschiedene Körper angewendet; zwei Metalle und ein dritter Körper, welcher keine Stelle in der Spannungsreihe einnimmt.

Die Metalle, welche man in der Regel anwendet, sind Kupfer und Zink, zwei Körper, welche in der Spannungsreihe sehr weit von einander abstehen. Zink bildet das positive, Kupfer das negative Element. Gewöhnlich ist eine Kupferplatte und eine Zinkplatte zusammengelöthet.

Eine Kupferplatte, also ein negatives Element, sey durch einen Kupferdraht *f*, Fig. 412, mit dem Boden in leitende Verbindung gebracht und auf ihre obere Fläche eine gleich große Zinkplatte gelegt. Durch die elektromotorische Kraft wird das Zink positiv, das Kupfer negativ erregt, die freie Elektricität der Kupferplatte strömt aber in den Boden über, während auf der Zinkplatte freie Elektricität von einer Dichtigkeit bleibt, welche von der elektrischen Differenz zwischen Kupfer und Zink abhängt.

Fig. 412.



Nehmen wir diese Dichtigkeit als Einheit an, so können wir sagen, daß unter diesen Umständen die Dichtigkeit der freien Elektricität auf dem Kupfer 0 sei, während sich über das Zink freie $+E$ von der Dichtigkeit 1 verbreitet. Wenn man durch irgend ein Mittel dem Zink einen Theil seiner freien E entzöge, so daß ihre Dichtigkeit geringer als 1 würde, so würde dieser Verlust, welchen die Zinkplatte an $+E$ erleidet, durch die elektromotorische Kraft sogleich wieder er-

setzt werden, während eine der neu entwickelten und auf die Zinkplatte übergehenden $+ E$ vollkommen gleiche Menge $- E$ auf die Kupferplatte und von dieser auf den Boden übergeht.

Man lege nun eine feuchte Scheibe auf das Zink. Nehmen wir der Einfachheit wegen an, sie äußere, in Berührung mit Zink, gar keine elektromotorische Kraft, und verhalte sich nur als Leiter, so geht ein Theil der freien $+ E$ vom Zink auf die feuchte Scheibe über, der Verlust wird aber alsbald wieder ersetzt, so daß die Dichtigkeit der freien $+ E$ auf dem Zink 1 bleibt, und auch auf der feuchten Scheibe sich freie $+ E$ von der Dichtigkeit 1 verbreitet. Wird nun auf die feuchte Scheibe wieder eine Kupferplatte gelegt, so wird sich auch auf dieser die $+ E$ verbreiten, und zwar wird sie auch hier sogleich die Dichtigkeit 1 erreichen. Auf der untersten Kupferplatte hat man also nun die Dichtigkeit Null auf der Zinkplatte, der feuchten Scheibe und der oberen Kupferplatte $+ E$ von der Dichtigkeit 1.

Legt man auch auf die obere Kupferplatte eine Zinkplatte, so würde auch diese mit freier $+ E$ von der Dichtigkeit 1 geladen werden, selbst wenn keine elektromotorische Kraft hier thätig wäre; nun aber bleibt die elektrische Differenz zwischen Kupfer und Zink stets dieselbe, sie ist nach unserer bisherigen Bezeichnung stets gleich 1; wenn also schon die obere Kupferplatte $+ E$ von der Dichtigkeit 1 hat, so muß die $+ E$ der darauf gelegten Zinkplatte die Dichtigkeit 2 haben.

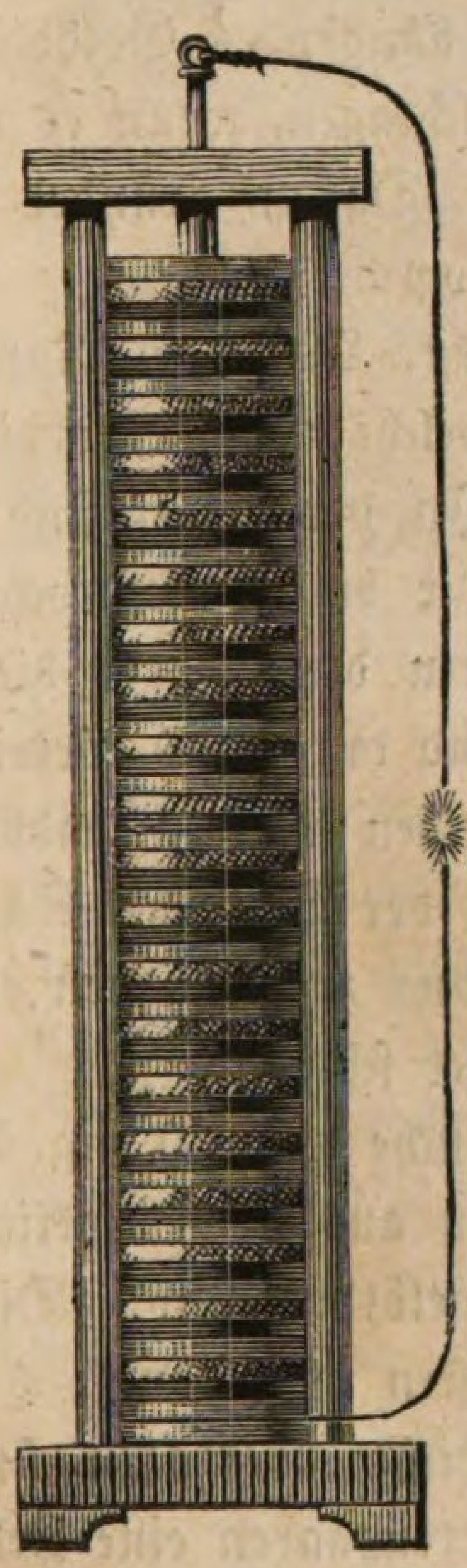
Auf dieselbe Art kann man weiter schließen. Legt man auf das zweite Zinkkupferpaar abermals eine feuchte Scheibe und darauf wieder eine Kupfer- und eine Zinkplatte in derselben Ordnung, so daß das Kupfer unten, das Zink oben hin kommt, so wird auf dieser dritten Zinkplatte die Dichtigkeit der freien $+ E = 3$ seyn. Baut man in derselben Ordnung fort, d. h. läßt man von unten nach oben fortbauend die Elemente stets in der Ordnung: Kupfer, Zink, feuchte Scheibe folgen, so wird auf der vierten, fünften . . . hundertsten Zinkscheibe sich freie $+ E$ von der Dichtigkeit 4, 5 . . . 100 finden.

Die eben beschriebene Anordnung führt nach seinem Erfinder den Namen der Volta'schen Säule. Fig. 413 stellt eine Volta'sche Säule von 20 Plattenpaaren dar. Das Fußgestell ist von trockenem Holze, die Stäbe auf der Seite, welche die Säule halten, sind von Glas.

Das eine Ende der Säule, nach welcher die Zinkplatten gerichtet sind, heißt der positive Pol, das andere Ende hingegen der negative Pol. In dem eben beschriebenen Arrangement war der negative Pol mit dem Boden in leitender Verbindung, der positive Pol war isolirt, und auf der ganzen Säule war $+ E$ verbreitet, deren Dichtigkeit nach unserer Betrachtung von unten nach oben zunehmen muß. Wenn der negative Pol isolirt und der positive Pol mit dem Boden in leitende Verbindung gesetzt wird, so ist die Dichtigkeit der freien Elektricität an dem positiven Pole Null, während sich über die ganze Säule freie $- E$ verbreitet, deren Dichtigkeit nach dem negativen Pole hin zunimmt.

Nehmen wir an, man habe eine Säule von 100 Paaren aufgebaut und den negativen Pol mit dem Boden in leitende Verbindung gesetzt, daneben eine zweite, der ersten ganz gleiche, deren positiver Pol ableitend berührt ist. Nun setze man die beiden Säulen zu einer einzigen zusammen, so aber, daß mit Einschaltung einer feuchten Scheibe die beiden ableitend berührten Pole (also der + Pol der einen und der — Pol der anderen) an einander stoßen, so hat man eine einzige Säule von 200 Paaren, deren Hälften sich noch ganz in dem Zustande befinden wie vorher: die Mitte befindet sich also im natürlichen Zustande, selbst wenn man die leitende Verbindung mit dem Boden aufgehoben hat. Die eine Hälfte ist positiv, die andere negativ geladen, und zwar wächst die Stärke der Ladung von der Mitte nach den Polen hin. Die elektrische Spannung an jedem Pole ist gerade so groß wie am isolirten Pole einer Säule von 100 Paaren, deren anderer Pol ableitend berührt ist. Stört man dieses Gleichgewicht, indem man von dem einen Pole etwas Elektricität wegnimmt, so wird hier die Spannung vermindert, am andern Pole vermehrt, und der Punkt der Säule, welcher sich im natürlichen Zustande befindet, wird von der Mitte mehr nach dem Pole hingerückt, welchem man Elektricität entzogen hatte. Wenn aber die ganze Säule isolirt bleibt, so stellt sich nach und nach der frühere Zustand wieder her, d. h. der Gleichgewichtszustand rückt allmälig wieder in die Mitte, weil an dem stärker geladenen Pole fortwährend auch ein größerer elektrischer Verlust stattfindet. In jeder ganz isolirten Säule stellt sich also von selbst das elektrische Gleichgewicht in der Weise her, daß die Mitte im natürlichen Zustande ist und die beiden Hälften mit den entgegengesetzten Elektricitäten geladen sind, deren Dichtigkeit nach den Polen hin von einem Plattenpaare zum anderen wächst.

Fig. 413.



Die Volta'sche Säule wird gewöhnlich zwischen drei in einem Brett von trockenem Holze befestigten Stäben von Glas aufgebaut, wie Fig. 413 zeigt.

Da die beiden Pole einer isolirten Säule immer Quellen entgegengesetzter Elektricität sind, so ist klar, daß, wenn man jeden mit einem Drahte versieht, der Draht sich mit der Elektricität seines Pols laden wird. Man hat also auf diese Weise einen positiv und einen negativ geladenen Conductor; wenn beide Conductoren mit einander in Berührung gebracht werden, muß also eine beständige Wiedervereinigung der in der Säule fortwährend entwickelten Elektricitäten stattfinden; es entsteht ein fortdauernder elektrischer Strom.

Die trockene Säule. Ganz nach dem Princip 189
der Volta'schen Säule hat Zamboni eine Säule construirt, in welcher der feuchte Leiter durch eine Papier-

scheibe ersetzt ist, und welche deshalb die trockene Säule genannt wird.

Man kann die trockenen Säulen am leichtesten aus unächtem Gold- und Silberpapier construiren. Zu diesem Zwecke klebt man immer einen Bogen unächtes Silberpapier (Zinn) und einen Bogen unächtes Goldpapier (Kupfer) mit der Papierseite zusammen, so daß man also ein Papierblatt hat, welches auf der einen Seite mit Kupfer, auf der anderen mit Zinn überzogen ist. Aus den so zusammengeklebten Bogen werden dann die Scheibchen ausgeschnitten. Gewöhnlich sind die trockenen Säulen in wohlgefirnißte Glasröhren gefaßt, die an beiden Enden mit Metallkappen versehen sind. Um die vollständige Berührung der Plattenpaare zu sichern, muß die ganze Säule etwas zusammengepreßt werden.

Die trockene Säule bringt vorzugsweise Spannungserscheinungen, aber keine merklichen Stromwirkungen hervor, wie wir sie bei der gewöhnlichen Volta'schen Säule bald werden kennen lernen. Eine Zamboni'sche Säule von 80 bis 100 Paaren bringt bereits ohne Condensator eine Divergenz am Goldblattelektrometer hervor. Mit einer solchen Säule von mehreren tausend Paaren kann man selbst eine recht dünnglasige Leidner Flasche laden.

Wenn man zwei Zambonische Säulen neben einander aufbaut, so daß der positive Pol der einen und der negative Pol der anderen nach oben gerichtet ist, so wird ein leichtes Pendel zwischen beiden Polen beständig hin und her oscilliren müssen. Darauf gründet sich das sogenannte elektrische perpetuum mobile.

Ein zwischen zwei solchen Zambonischen Säulen hängendes Goldblättchen wird nach dem einen oder dem anderen Pole hin ausschlagen, wenn es nur eine ganz schwache positive oder negative Ladung erhält. Darauf gründet sich die Construction des Bohnenberger'schen Elektroskops.

190 **Verschiedene Formen der galvanischen Kette.** Mit dem Namen der galvanischen Ketten bezeichnet man alle Apparate, welche zur Hervorbringen eines continuirlichen elektrischen Stromes dienen. In der Regel sind sie aus zwei Metallen und einer Flüssigkeit construirt. Die bisher besprochene Volta'sche Säule war der erste Apparat der Art; allein diese Form bietet mannigfache Mißstände. Die unteren Scheiben nämlich sind durch das Gewicht der oberen stärker zusammengedrückt; die feuchten Scheiben werden dadurch ausgepreßt, sie werden trocken, während die Flüssigkeit an der Seite der Säule herunterrinnt; dadurch wird aber eine leitende Verbindung zwischen den einzelnen Plattenpaaren hervorgebracht, welche den Totaleffect schwächt.

Der Trogapparat, welcher längere Zeit im Gebrauche war, ist Fig. 414 und Fig. 415 dargestellt. Die einzelnen Elemente bestehen aus rechtwinkligen Platten von Kupfer und Zink, welche auf einander gelöthet sind. Diese Plattenpaare sind nun einander parallel in einem Kasten von Holz, *b b'*, dessen Wände inwendig mit einer nichtleitenden Harzschicht überzogen sind, so befestigt, daß der Zwischenraum zwischen je zwei Plattenpaaren eine Zelle, einen Trog bildet, der mit gesäuertem Wasser gefüllt wird. Diese Wasser-

schicht, welche ungefähr 3 Linien dick ist, vertritt hier die Stelle der feuchten Scheibe.

Fig. 414.

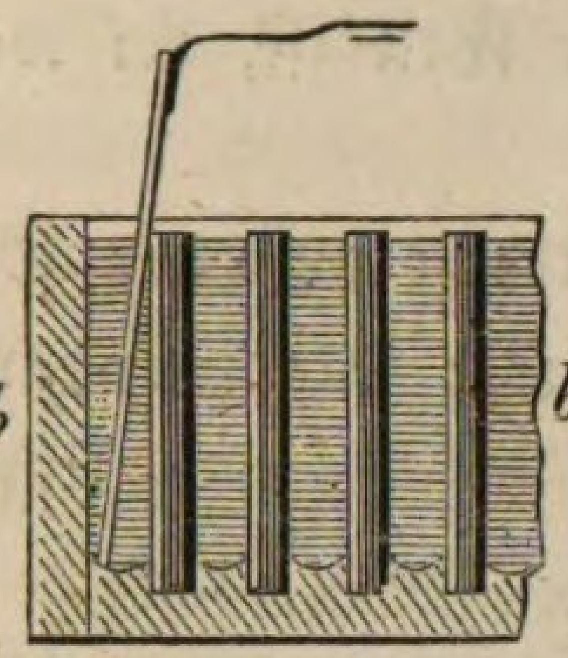
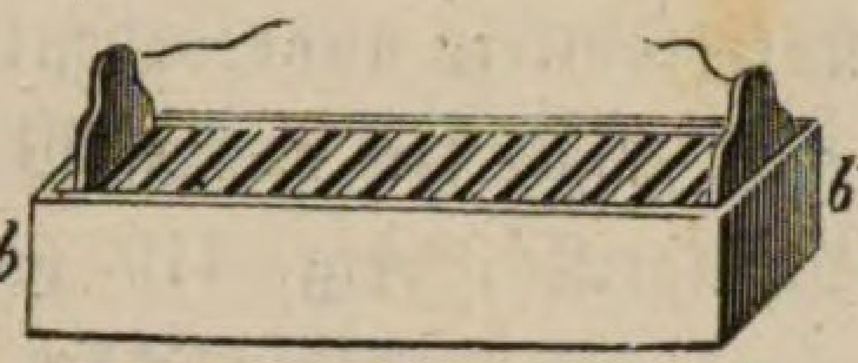


Fig. 415.



Bei anderen galvanischen Apparaten befindet sich die Flüssigkeit in getrennten Gefäßen oder Gläsern. Jedes Glas enthält eine Zink- und eine Kupferplatte, die einander nicht berühren; jede Zinkplatte ist durch einen Kupferdraht oder Kupferstreifen mit der Kupferplatte des vorhergehenden Glases verbunden. In diese Klasse gehört vorzüglich die Wollaston'sche Batterie. Um die Construction besser verstehen zu können, wollen wir vorerst zwei Plattenpaare betrachten, welche Fig. 416 von der Seite und Fig. 417 von vorn gesehen dargestellt sind.

Fig. 416.

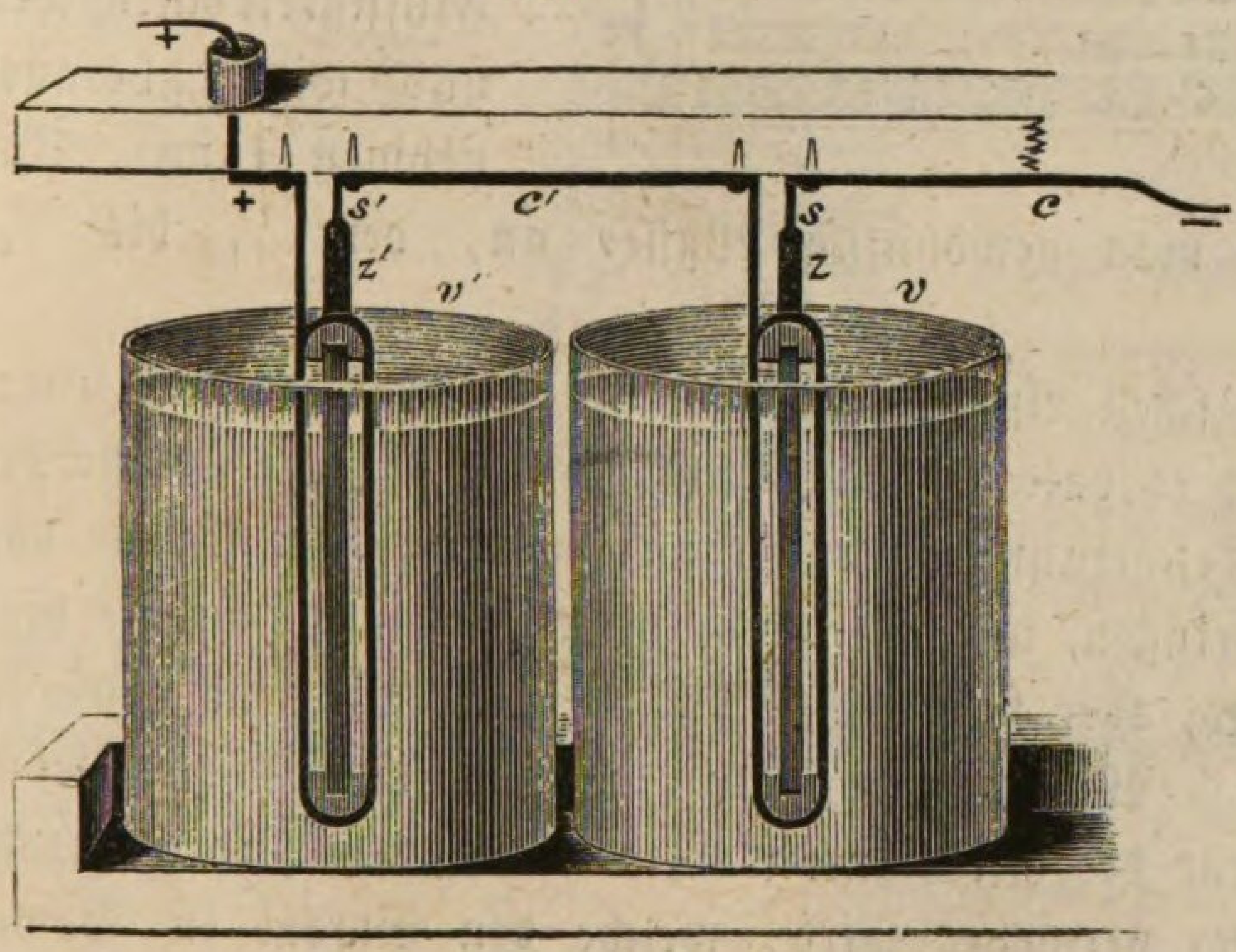
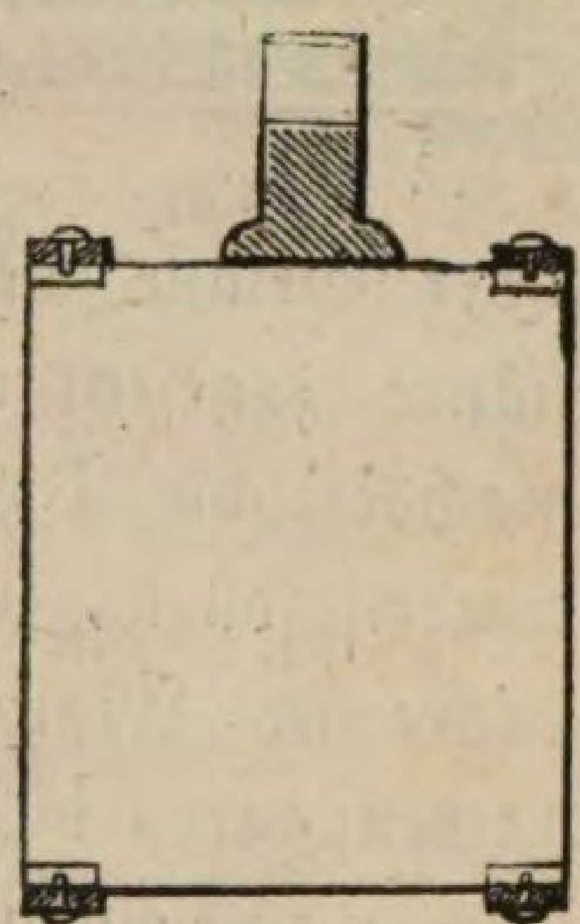


Fig. 417.



Der Kupferstreifen *c s* ist an der Zinkplatte *s z* bei *s* angelöthet; *c' s'* ist ein zweiter Kupferstreifen, welcher bei *s'* an eine zweite Zinkplatte angelöthet ist. Der Kupferstreifen *c' s'* hängt aber mit einer Kupferplatte zusammen, welche ganz um die erste Zinkplatte herumgebogen ist, ohne dieselbe zu berühren.

Um die zweite Zinkplatte geht ebenso eine Kupferplatte herum, die mit dem einen Poldrahte verbunden ist. Jedes Plattenpaar ist in ein mit gesäuertem Wasser gefülltes Gefäß eingetaucht. Die erste Zinkplatte wird, in Berührung mit dem Kupferstreifen *c s*, + elektrisch; diese positive Ladung geht durch die Flüssigkeit zu der Kupferplatte über, welche das Zink ohne Berührung umgiebt, von dieser Kupferplatte durch den Kupferstreifen zu der zweiten Zinkplatte u. s. w. Diese Anordnung bietet große Vortheile dar. 1) Den beiden Oberflächen jeder Zinkplatte steht eine Kupferfläche gegenüber; 2) ist die flüssige

Schicht, durch welche die Elektricität hindurchgehen muß, um von einer Zinkplatte auf die nächste Kupferplatte überzugehen, äußerst dünn, und 3) wird wegen der bedeutenden Masse der Flüssigkeit in jedem Gefäße ihre Natur nicht so schnell verändert als dies beim Trogapparate der Fall ist, bei welchem deshalb die Wirksamkeit außerordentlich abnimmt.

Fig. 418 zeigt die ganze Wollaston'sche Batterie von der Seite, Fig. 420 im Grundrisse, Fig. 419 von vorn. Sämmtliche Plattenpaare sind an

Fig. 418.

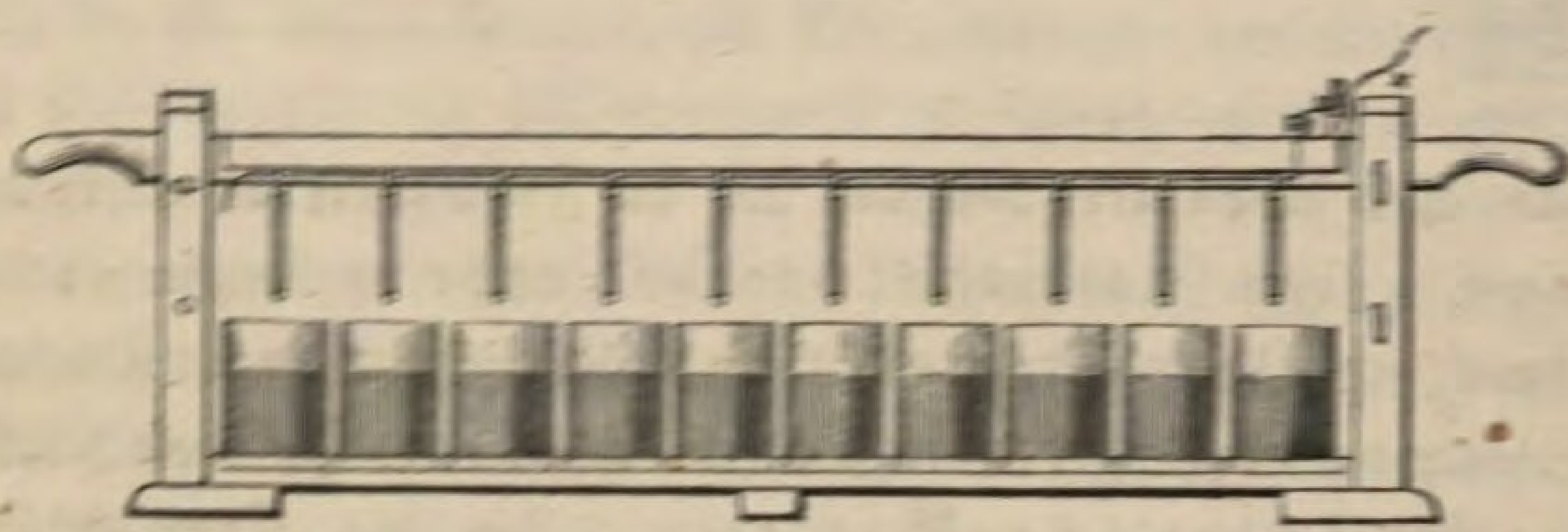


Fig. 419.

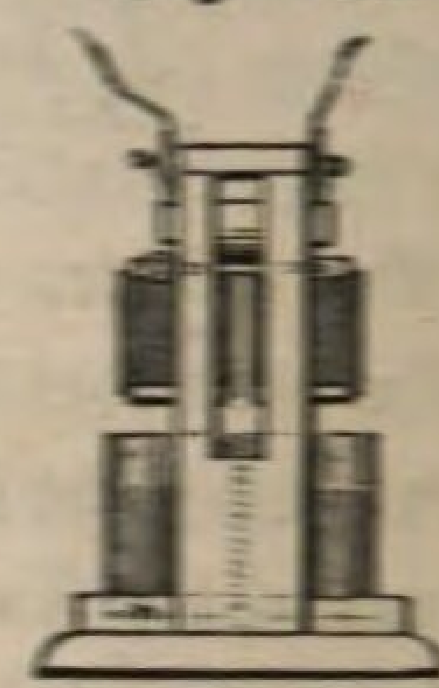
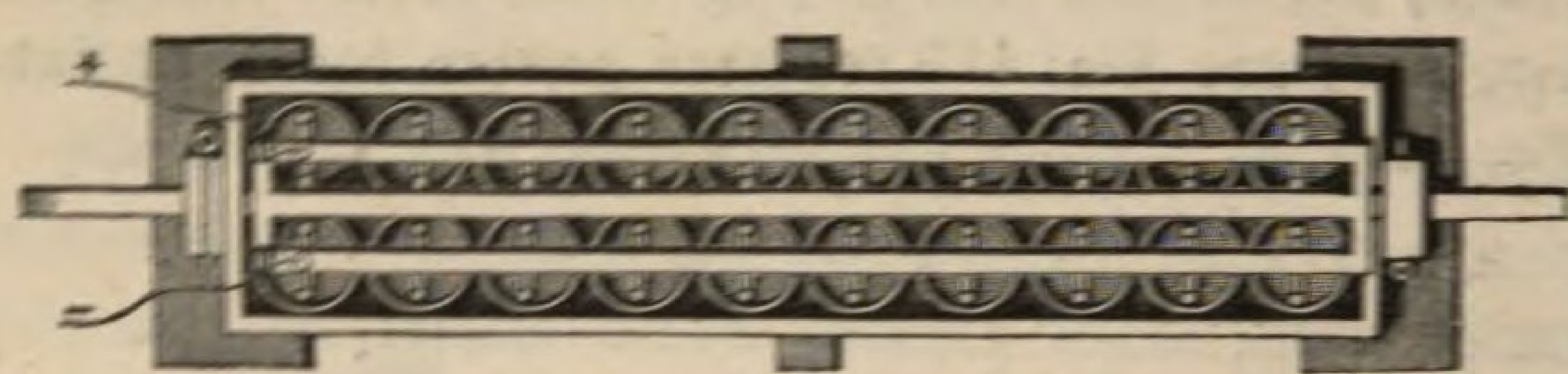


Fig. 420.

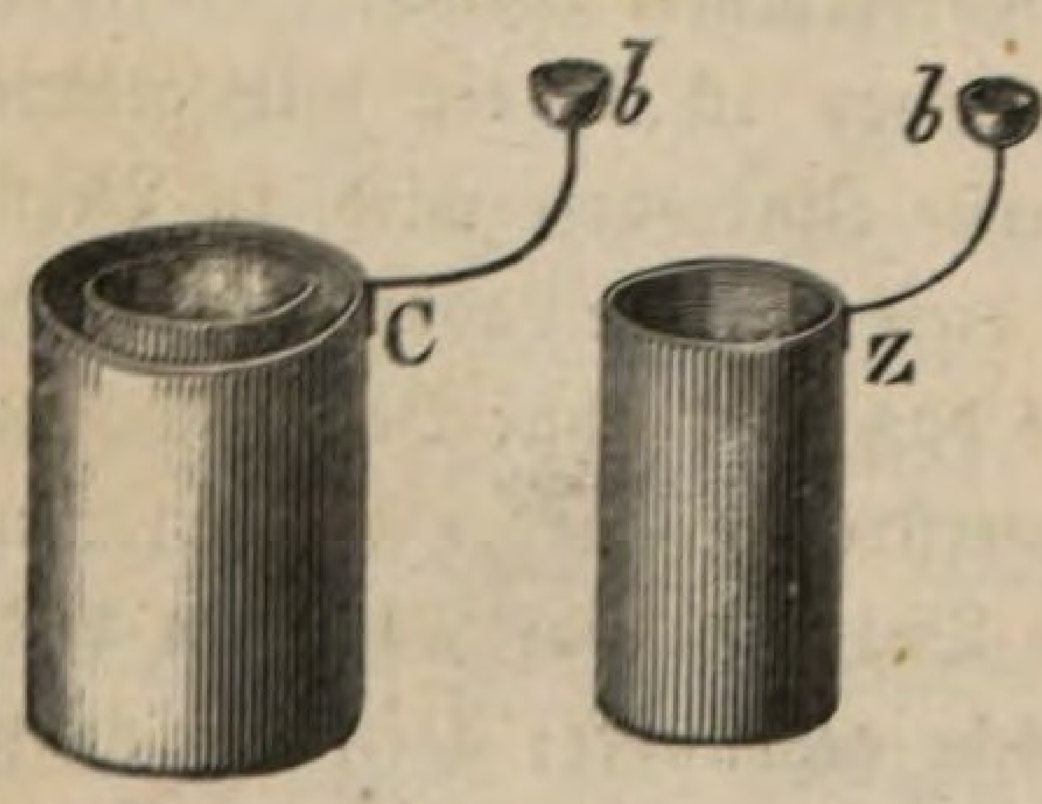


einer Holzleiste befestigt, so daß man sie gleichzeitig in die Flüssigkeit eintauchen und wieder herausnehmen kann. Zur Füllung der Gefäße wendet man gewöhnlich Wasser an, dem $\frac{1}{12}$ bis $\frac{1}{20}$ Schwefelsäure zugesetzt ist.

Je nachdem die Volta'schen Apparate zu verschiedenen Versuchen angewendet werden sollen, kommt es bald auf die Anzahl, bald auf die Größe der Plattenpaare an. Manche Erscheinungen kann man nur mit einer Säule von vielen Plattenpaaren hervorbringen, wenn sie auch nicht groß sind; andere hingegen erfordern nur ein einziges, aber sehr großes Plattenpaar mit sehr vollkommener metallischer Schließung. Wir werden später sehen, daß durch die Größe der Plattenpaare die Quantität der circulirenden Elektricität, durch ihre Anzahl aber die elektrische Spannung vermehrt wird, welche den Strom in Bewegung setzt.

Zu solchen Versuchen, welche eine große Quantität circulirender E, aber eine geringe Spannung erfordern, wendet man die sogenannten einfachen Ketten an. Eine solche ist in Fig. 421 dargestellt. C ist ein Gefäß, welches durch

Fig. 421.



zwei Cylinder von Kupferblech gebildet ist, die ungleichen Durchmesser haben, von denen der eine in dem anderen steckt und die am Boden mit einander verbunden sind, so daß ein Raum zwischen beiden bleibt, der den Zinkcylinder Z und das gesäuerte Wasser aufnimmt. An dem Zinkcylinder ist ein Kupferdraht angelöthet, der mit einem Näpfchen endigt, in welches Quecksilber gegossen wird.

Ein ähnliches Quecksilbernäpfchen ist an dem Kupfergefäße angelöthet. Wenn man den Zinkcylinder in das Kupfergefäß hineinstellt, so muß man dafür sorgen, daß das Zink mit dem Kupfer nicht in leitende Berührung kommt. Man hindert diese Berührung am besten durch einige Stückchen Kork. Wenn man die Kette schließen will, so verbindet man die Quecksilbernäpfchen durch einen Metalldraht. Dieser Apparat hat den großen Vorzug, daß man das Zink sehr bequem reinigen kann.

Wenn es auf eine sehr große Oberfläche der Metallplatten ankommt, wendet man Hare's Calorimotor an, welcher Fig. 422 und Fig. 423 dargestellt ist. Auf einem Holzcylinder *b*, welcher etwa 3 Zoll im Durchmesser hat und 1 bis 1,5 Fuß hoch ist, sind zwei Platten, die eine von Zink, die andere von Kupfer, gleichsam aufgewickelt, welche durch Tuchstreifen *l* von einander getrennt sind. Man erhält auf diese Weise ein Plattenpaar von 50 bis 60 Quadratfuß Oberfläche. Der Name Calorimotor rührt daher, weil dieser Apparat ganz besonders geeignet ist, Metalldrähte glühend zu machen und zu schmelzen.

Fig. 422.

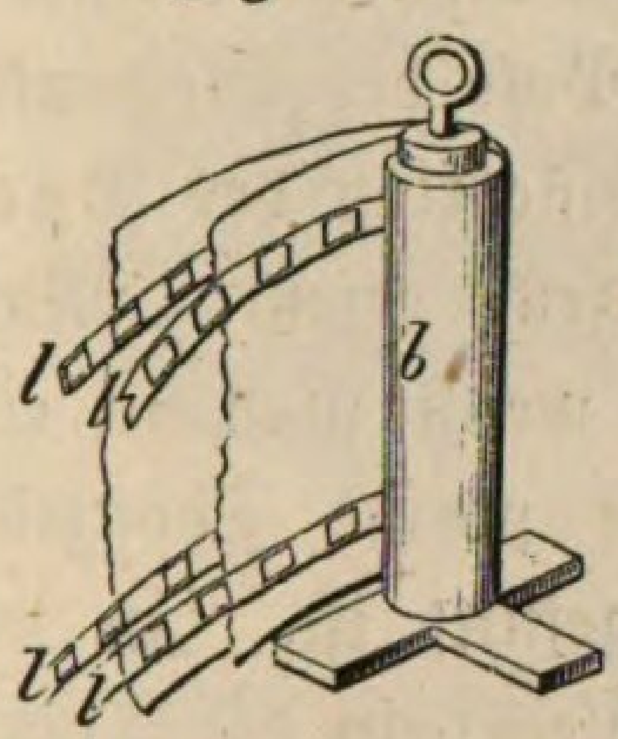
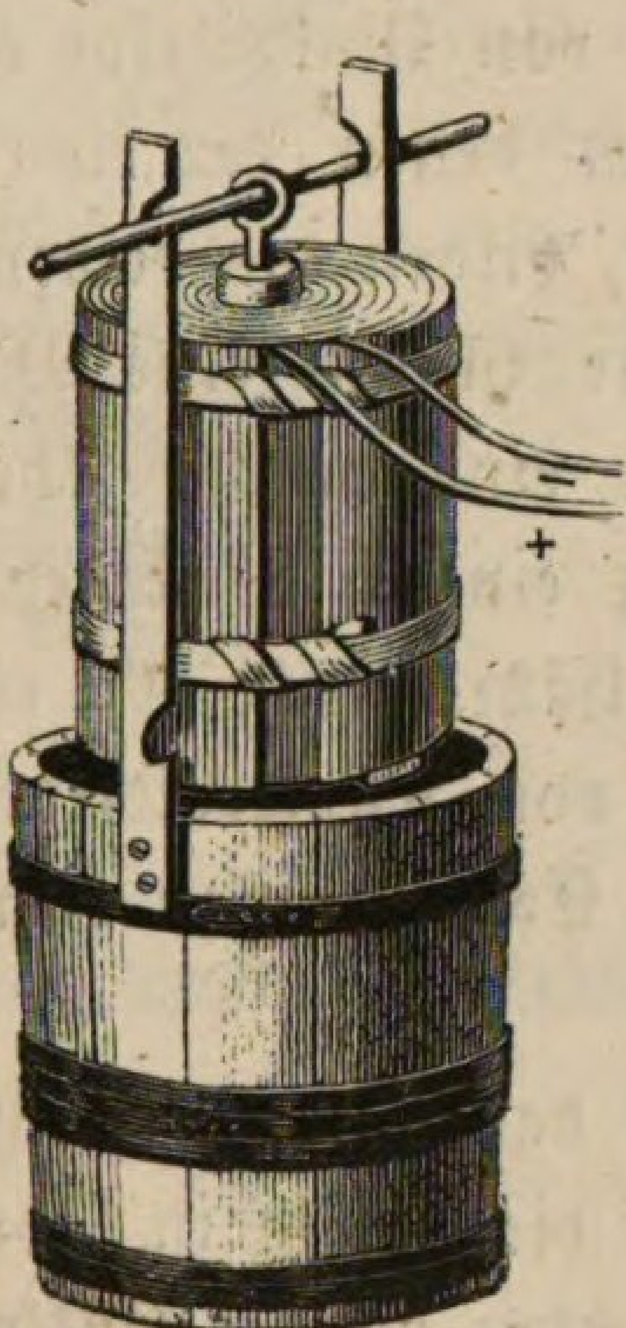
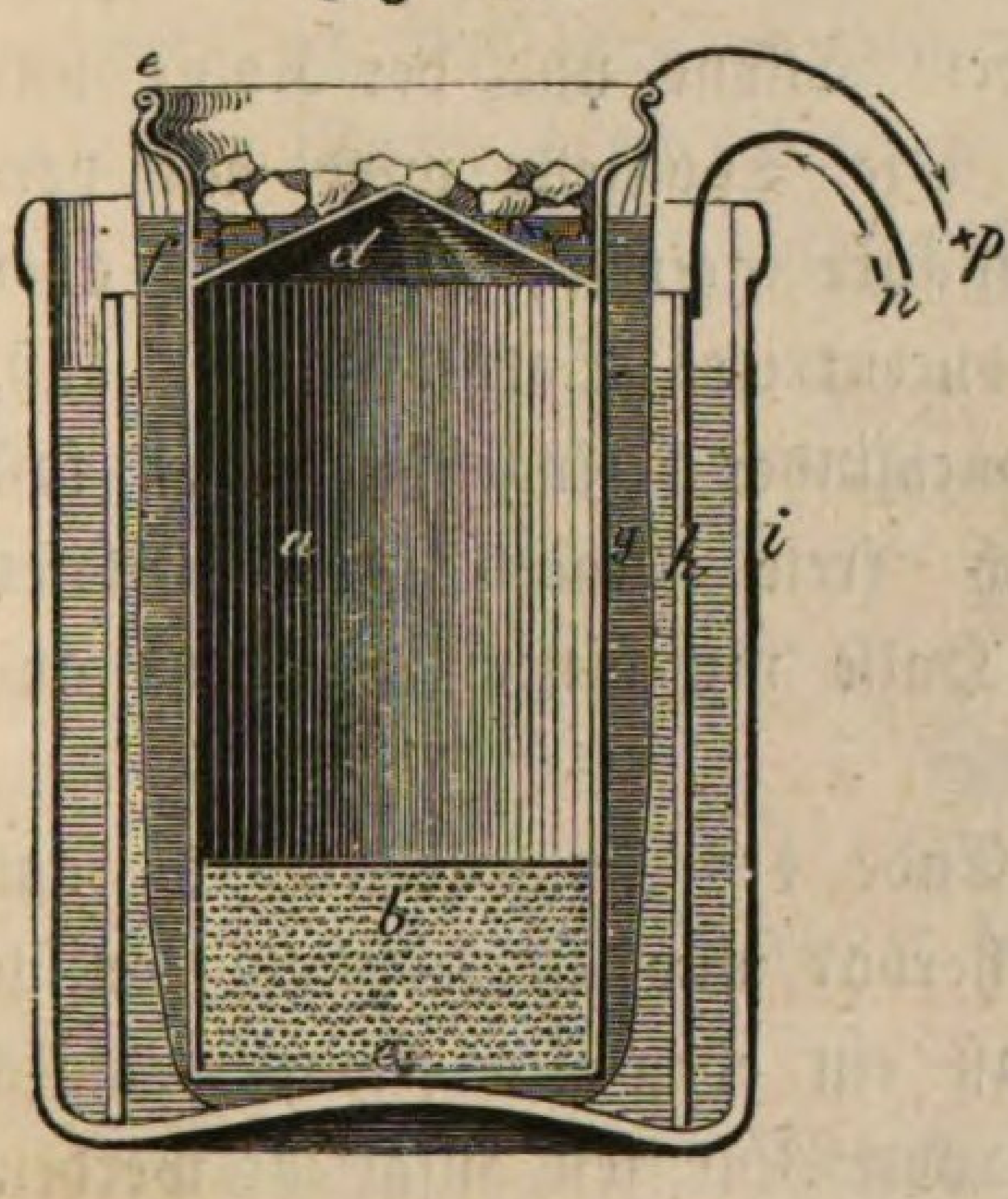


Fig. 423.



Bei allen den bis jetzt besprochenen einfachen und zusammengesetzten Ketten ist die Wirkung gleich nach dem Eintauchen in die saure Flüssigkeit sehr energisch; sie nimmt aber sehr rasch ab. Diese Veränderlichkeit des Stromes ist nun für immer, namentlich dann störend, wenn es sich darum handelt, vergleichende Versuche über die Stromkraft anzustellen. Von diesem Uebelstande sind nun die sogenannten constanten Batterien frei, die erst in neuerer Zeit in Aufnahme gekommen sind. Hier wird vor der Hand nur eine Beschreibung der wichtigsten constanten Ketten folgen; die Theorie derselben aber, sowie die Auseinandersetzung der Gründe, warum in gewöhnlichen Ketten die Stromkraft so rasch abnimmt, muß einem späteren Kapitel vorbehalten bleiben.

Fig. 424.



Als Erfinder der constanten Ketten muß Becquerel genannt werden. Die Fig. 424 stellt ein Element einer constanten Becquerel'schen Kette dar; es besteht aus einem hohlen Cylinder *a* von ganz dünnem Kupferblech, welcher durch etwas Sand *b* beschwert und von allen Seiten verschlossen ist. Der

untere Boden *c* ist eben, der obere Boden *d* ist konisch, über demselben erhebt sich ein Rand *e*, in dem mehrere Löcher angebracht sind. Der ganze Cylinder ist nun mit einer Thierblase *g* umgeben, welche an dem Rande *e*, über den Löchern *f*, befestigt ist. Auf den Kegel *d* gießt man nun eine Auflösung von Kupfervitriol, welcher durch die Löcher *f* ausläuft, um den Raum zwischen der Blase und dem Cylinder *a* auszufüllen; auf den Kegel *d* werden einige Stücke Kupfervitriol gelegt, welche nach und nach in der Flüssigkeit aufgelöst werden, von welcher sie immer umspült seyn müssen. Die Blase ist von einem hohlen Zinkcylinder *h* umgeben, welcher der Länge nach aufgeschlitzt ist, so daß man ihn nach Belieben etwas enger oder weiter machen kann. Dieser Zinkcylinder sowohl, wie die Blase, welche den Kupfercylinder und die Kupfervitriollösung enthält, sind in ein Gefäß *i* von Glas oder Porzellan getaucht, welches verdünnte Schwefelsäure oder eine Lösung von Zinkvitriol oder Kochsalz enthält. Zwei starke Kupferdrähte *p* und *n*, von denen der eine an den Zinkcylinder, der andere an das Kupfer angelöthet ist, bilden die beiden Pole des Elements.

Daniell's constante Batterie ist nur eine Modification der Becquerel'schen, die Thierblase ist durch eine poröse Thonzelle ersetzt. Man kann ein Daniell'sches Element ganz einfach herstellen, wenn man in ein Glasgefäß, welches verdünnte Schwefelsäure enthält, eine poröse Thonzelle setzt, die mit einer gesättigten Lösung von Kupfervitriol gefüllt ist. In die verdünnte Schwefelsäure wird dann ein Cylinder von Zinkblech, in die Thonzelle ein solcher von Kupferblech gesetzt.

In der Bunsen'schen Batterie ist das Kupfer durch die noch mehr elektronegative Kohle ersetzt, und zwar wird die Kohle in Form von hohlen Cylindern angewendet. Ein solcher hohler, unten offener Cylinder ist, wie man in Fig. 425 sieht, in ein Glasgefäß gestellt, welches oben etwas enger ist, so daß hier kein merklicher Zwischenraum zwischen der Kohle und dem Glase bleibt, der Cylinder also ganz fest im Glase steht. In die Höhlung des Kohlencylinders wird nun ein hohler unten verschlossener Cylinder von porösem Thon gestellt, welcher einen solchen Durchmesser hat, daß er eben in die Höhlung des Kohlencylinders paßt und zwischen dem Thone und der Kohle nur noch ein ganz geringer Zwischenraum bleibt. Die Thonzelle wird mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt, das Glas aber enthält so viel concentrirte Salpetersäure, daß, wenn der Thoncylinder eingesetzt ist, fast der ganze noch freie Raum des Glases bis zum engeren Halse mit dieser Flüssigkeit angefüllt ist.

Fig. 425.

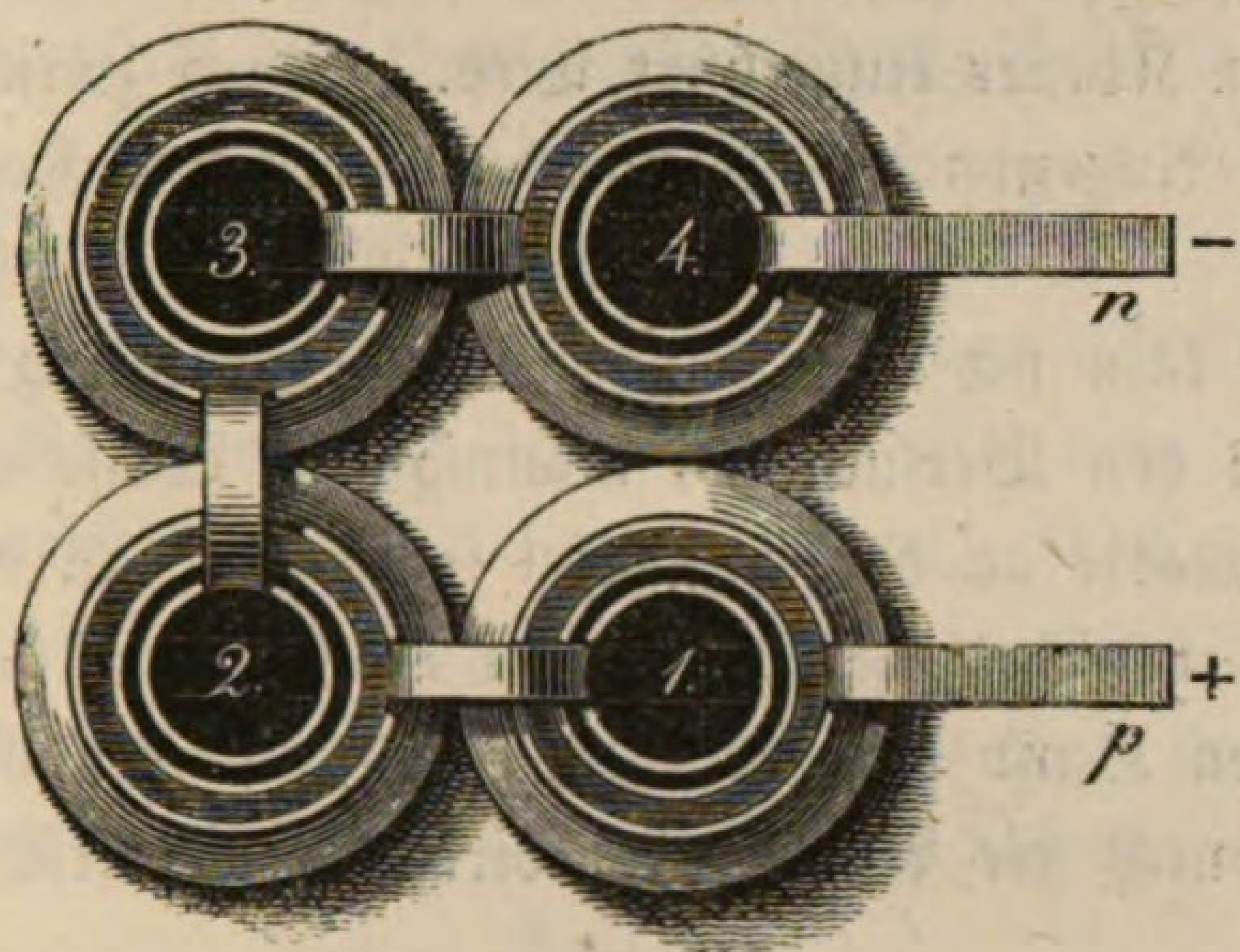


Das obere Ende des Kohlencylinders ragt aus dem Glase hervor und ist schwach konisch abgedreht, so daß ein ebenfalls etwas weniges konischer Ring *a* von Zink fest aufgesetzt werden kann. Der Ring trägt vermittelst des Zinkbü-

gels *b* einen hohlen Zinkcylinder *c*. Dieser Cylinder *c* hängt in die mit verdünnter Schwefelsäure gefüllte Thonzelle des folgenden Glases.

Wie ein Zinkkohlenpaar mit dem nächsten verbunden ist, sieht man deutlich aus Fig. 426, welche eine Combination von vier Paaren im Grundrisse darstellt. Die Kohlencylinder sind durch horizontale Schraffirung unterschieden. Innerhalb eines jeden Kohlencylinders sieht man in der Figur zwei weiße Ringe; der äußere derselben stellt den von oben gesehenen Thoncylinder, der innere den Zinkcylinder dar. Der Zinkcylinder des ersten Glases ist durch einen Bügel mit dem Zinkringe verbunden, welcher den Kohlencylinder des zweiten Glases umfaßt. Ebenso verbindet ein Zinkbügel den Zinkcylinder des zweiten mit dem Zinkringe des dritten Glases, u. s. w. Der Ring, welcher auf dem ersten Kohlencylinder aufsitzt, endigt mit einem Zinkstreifen *p*, welcher als positiver Pol dient; der Zinkstreifen *n*, mit welchem der Zinkcylinder im vierten Glase endigt, ist der negative Pol der Kette.

Fig. 426.



Auf dieselbe Weise werden Ketten von beliebig vielen Paaren zusammengesetzt.

In jedem einzelnen Paare geht der positive Strom von dem Zinkcylinder durch die Flüssigkeit zur Kohle.

Die Kohle zu diesen Cylindern wird auf eine eigene Weise aus Steinkohlen und Coaks bereitet, die wir hier nicht näher betrachten können.

Eine zweckmäßige Abänderung der Construction der Zinkkohlenkette besteht darin, daß der Ring *a*, Fig. 425, und der Zinkcylinder *c* nicht ein Ganzes bilden, sondern daß der Bügel *b* in der Mitte aufgeschnitten und die Einrichtung getroffen ist, daß man die beiden Stücke zusammenschrauben kann.

Die Grove'sche Batterie ist in ihren Constructionen der Bunsen'schen sehr ähnlich, nur wird Platin statt der Kohlen angewendet.

Zweites Kapitel.

Wirkungen des galvanischen Stromes.

Physiologische Wirkungen der Säule. Berührt man mit trockenen 191
Fingern die beiden Pole einer Säule von 20 bis 30 Paaren, so fühlt man nicht

den mindesten Schlag; er wird aber sogleich merklich, wenn man die Hände befeuchtet hat. Der Schlag einer Säule von 80 bis 100 Paaren ist sehr empfindlich; überhaupt hängt die Stärke der physiologischen Wirkung von der Anzahl, nicht von der Größe der Plattenpaare ab.

Man empfindet einen Schlag in dem Momente, in welchem man die Kette durch die Finger schließt. So lange die Kette geschlossen bleibt, circulirt der elektrische Strom durch den Körper, ohne eine sehr merkliche Wirkung auf das Gefühl hervorzubringen; nur bei kräftigen Säulen von vielen Plattenpaaren empfindet man während des Geschlossenseyns ein brennendes singelndes Gefühl an den Stellen, wo der Strom in den Körper eingeführt wird. Einen zweiten Schlag empfindet man aber in dem Augenblicke, in welchem man die Kette wieder öffnet.

Schon durch eine einfache Kette läßt sich eine blitzähnliche Erscheinung in den Augen hervorbringen. Man kann den Versuch auf mannigfache Weise anstellen; man bringt z. B. eine Silberplatte an den Augapfel selbst oder an das zuvor gut angefeuchtete Augenlid und berührt sie darauf mit einem Zinkstücke, welches man in der wohl angefeuchteten Hand hält oder im Munde stecken hat. Leitet man den Strom einer Säule durch die Augen, so wird die Lichterscheinung stärker.

Legt man ein Zinkstück auf, ein Silberstück unter die Zunge, bringt man alsdann die vorderen Enden beider Metalle in Berührung, so empfindet man einen eigenthümlichen bitteren Geschmack.

192 **Licht- und Wärmeerzeugung durch galvanische Ströme.** Die galvanischen Ströme bringen, wie die der Reibungselektricität, Wärme und Licht hervor.

Wenn man einen galvanischen Strom durch einen Metalldraht leitet, so erwärmt er sich; damit aber eine kräftige Wirkung erhalten wird, muß der Schließungsdraht kurz und dünn seyn. Je größer die wirkende Oberfläche des galvanischen Apparates ist, desto dickere Drähte kann man damit glühend machen und schmelzen. Je länger der Draht ist, desto mehr Elemente muß man zur Säule vereinigen, um die erwähnten Wirkungen hervorzubringen.

Eisen- und Stahldraht wird weißglühend, schmilzt und verbrennt unter lebhaftem Funkensprühen.

Platindraht wird lebhaft glühend und schmilzt ab, wenn er für die angewendete Kette kurz und dünn genug ist.

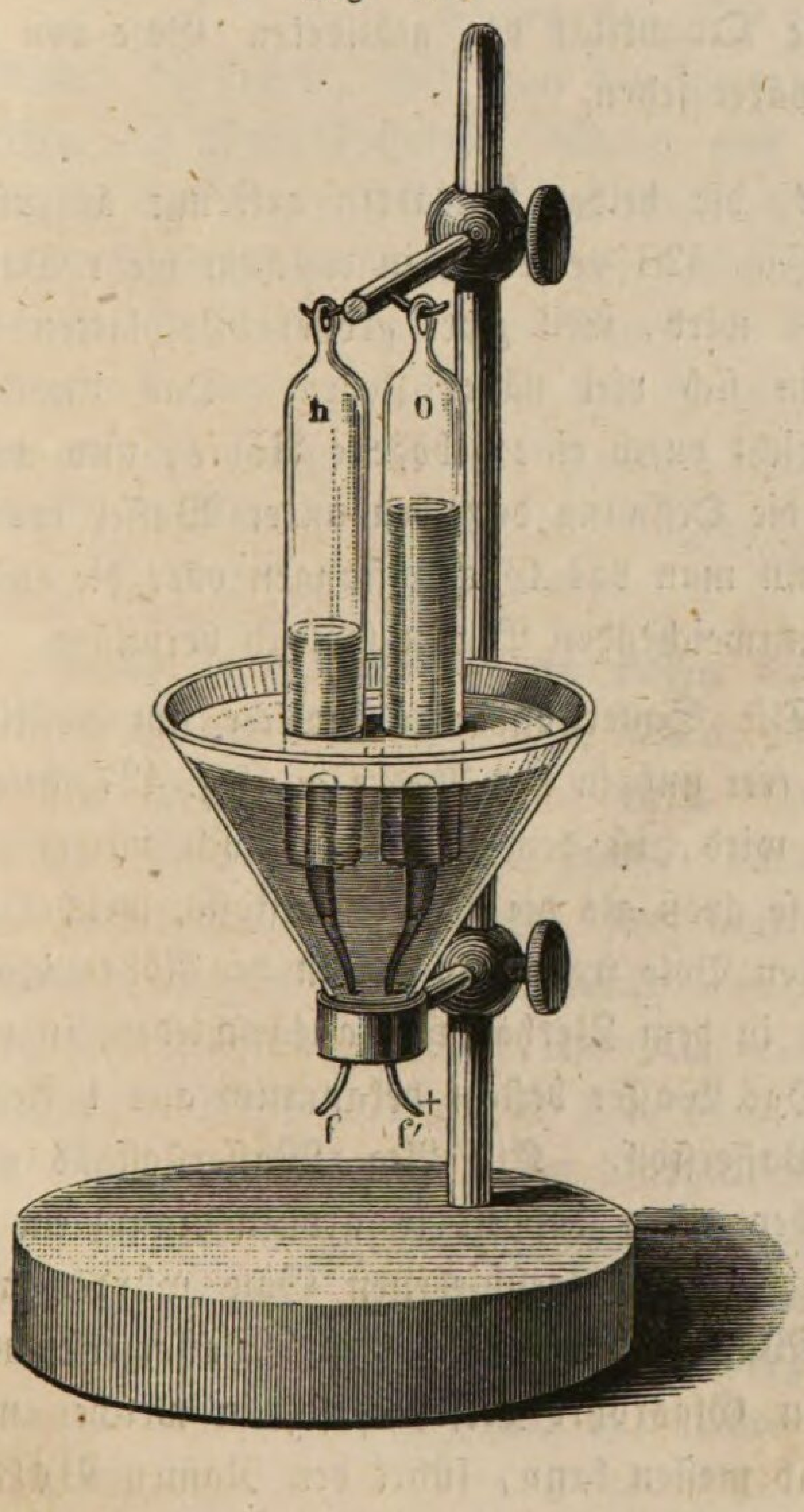
Das galvanische Glühen der Metalldrähte hat man mit Erfolg zum Sprengen von Felsen benutzt.

Befestigt man an die beiden Pole einer galvanischen Kette zugespitzte Kohlenstücke, am besten von derselben Masse, aus welcher die Kohlencylinder der Bunsen'schen Batterie gemacht sind, so wird man, sobald man diese Spitzen in Berührung bringt, zwischen ihnen ein ungemein glänzendes Licht wahrnehmen. Dies helle Licht läßt sich schon mit einem Bunsen'schen Apparate von vier Elementen zeigen; da, wo sich die Kohlenspitzen berühren, erscheint ein kleiner,

sehr hell leuchtender Stern. Wenn man die Zahl der Becher vermehrt, so nimmt der Glanz der Erscheinung außerordentlich zu; mit einer Kette von 30 bis 50 Elementen erhält man ein Licht, welches das Drummond'sche Kalklicht weit übertrifft. Bei Anwendung so vieler Paare kann man auch die Kohlenspitzen, wenn einmal der Strom übergeht, ziemlich weit von einander entfernen, und so erhält man durch die glühenden Kohlenpartikeln, welche von einem Pole zum anderen übergehen, das herrliche Phänomen eines Lichtbogens. Man hat dieses Licht zur Beleuchtung im Großen vorgeschlagen, bis jetzt aber noch keine praktischen Resultate erhalten; dagegen hat man mit Erfolg das Kalklicht der sogenannten Knallgasmikroskope durch das Kohlenlicht ersetzt.

Chemische Wirkungen der Volta'schen Säule. Die chemischen 193
Wirkungen der Säule wurden zuerst (30. April 1800) von Carlisle und Nicholson beobachtet. Diese beiden Physiker hatten, um die Volta'schen Versuche zu wiederholen, in der Eile eine Säule von Geldstücken, Zinkplatten und feuchten Pappscheiben aufgebaut. Nach einigen Versuchen wurde der eigenthümliche Geruch von Wasserstoffgas merklich, und Nicholson kam, dadurch veranlaßt, auf den glücklichen Gedanken, den Strom durch Wasser gehen zu lassen, indem er die beiden Poldrähte in dasselbe eintauchte und in einer kleinen Entfernung von einander hielt. Bald stieg das Wasserstoffgas in kleinen Bläschen am negativen Pole auf, während der positive, aus Zink bestehende Poldraht sich oxydirte. Wird für den positiven Poldraht Platin oder Silber genommen, so oxydirt er sich nicht, sondern das Sauerstoffgas steigt ebenfalls in Bläschen in die Höhe. — So war denn endlich das Wasser direct in seine Elemente zerlegt. Cavendish hatte zwar schon gezeigt, daß Sauerstoff und Wasserstoff sich zu Wasser verbinden, aller Anstrengung ungeachtet war aber die directe Zersetzung des Wassers noch nicht gelungen. Ein passender Apparat zur Wasserzersetzung ist Fig. 427 dargestellt. Er besteht aus einem Glase, durch dessen isolirenden Boden zwei Kupferdrähte hindurchgehen, welche sich jedoch nicht berühren dürfen. An diese Drähte sind Platinplatten angelöthet, die Löthstelle aber und der Kupferdraht, soweit

Fig. 427.



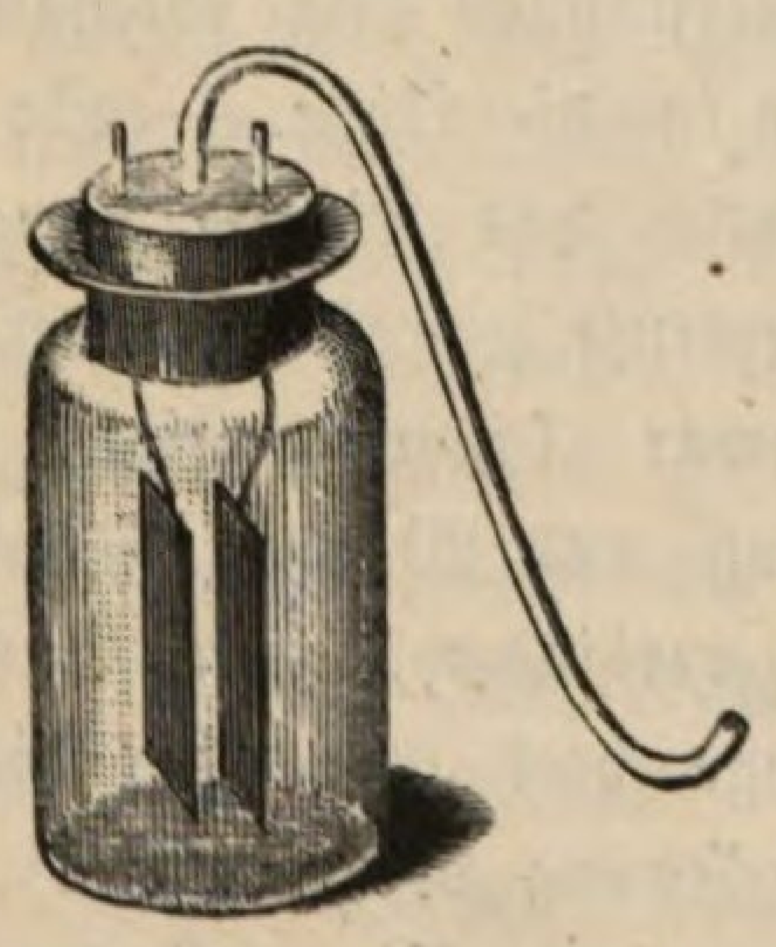
er sich im Gefäß befindet, ist sorgfältig mit Siegellacklösung überzogen. Zwei Glasglöckchen *o* und *h* sind mit gesäuertem Wasser gefüllt und hängen in das Glas herab, so daß sich über jeder der beiden Polplatten ein solches Glöckchen befindet. Sobald man nun die Drähte *f* und *f'* mit den Polen der Säule in Verbindung bringt, entwickeln sich Gasblasen in reichlichem Maaße. Reines Sauerstoffgas steigt immer in dem einen Glöckchen über dem positiven Pole auf, das Wasserstoffgas im anderen. Es versteht sich von selbst, daß das Wasser in den Glöckchen von dem Wasser in dem Gefäße nicht abgesperrt seyn darf, damit der Strom von einem Drahte durch die Flüssigkeit zum anderen gelangen könne.

Die Gasentwickelung ist um so lebhafter, je näher die Polplatten einander sind und je größer die Oberfläche des Metalls ist, welche mit dem Wasser in Berührung steht. Man wendet deshalb, anstatt der ursprünglich gebräuchlichen Poldrähte, Platinplättchen an.

Das destillirte und vollkommen reine Wasser wird auf diese Weise doch nur langsam zersetzt; sobald man aber nur einige Tropfen irgend einer Säure zugießt, wodurch sein Leitungsvermögen bedeutend erhöht wird, beginnt eine sehr lebhafte Gasbildung, so daß man in kurzer Zeit eine ziemlich bedeutende Menge der Gase auffangen kann. Wie die Quantität der gebildeten Gase von der Stromstärke abhängt, werden wir später sehen.

Wenn es nicht darauf ankommt, die beiden Gasarten getrennt aufzufangen, kann man sich des Apparates Fig. 428 bedienen, in welchem mehr Wasser zersetzt wird, weil zwei größere Polplatten von Platin sich viel näher stehen. Das Knallgas entweicht durch eine gebogene Röhre, und wenn man die Oeffnung derselben unter Wasser taucht, so kann man das Gas auffangen oder die einzelnen entweichenden Blasen sogleich verpuffen.

Fig. 428.

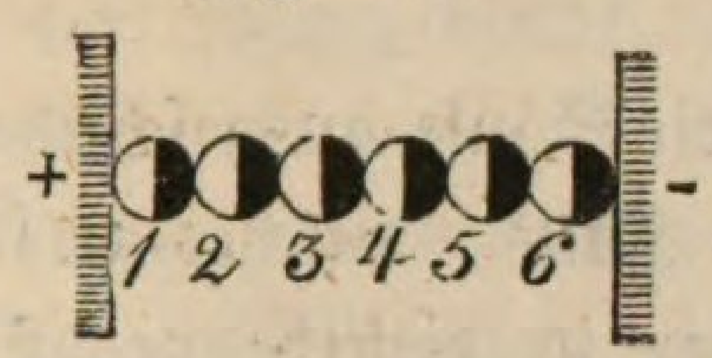


Die Sauerstoffmenge, welche am positiven Pole frei und in der Röhre *o*, Fig. 427, gesammelt wird, ist dem Volumen nach immer nur halb so groß als die des Wasserstoffs, welcher am anderen Pole frei wird und in der Röhre *h* aufsteigt. Die Gase werden also gerade in dem Verhältnisse ausgeschieden, in welchem sie sich zu Wasser verbinden. Das Wasser besteht bekanntlich aus 1 Aequivalent Sauerstoffgas + 1 Aeq. Wasserstoff. Ein Aeq. Wasserstoffgas aber nimmt unter sonst gleichen Umständen einen doppelt so großen Raum ein als 1 Aeq. Sauerstoff. Die durch die Säule ausgeschiedenen Gase würden also, mit einander verbunden, wieder Wasser geben. — Ein Wasserzersetzungsapparat, der mit einer graduirten Glasröhre versehen ist, in welcher man das gebildete Knallgas auffangen und messen kann, führt den Namen Volta-

meter, weil die Menge des in einer bestimmten Zeit durch den Strom zersetzten Wassers ein Maaß für die Stromstärke ist.

Grotthuß hat von dieser merkwürdigen Erscheinung folgende Erklärung gegeben, welche jetzt von fast allen Physikern als die richtige angenommen wird. Wenn Wasserstoffgas mit Sauerstoffgas zu Wasser verbunden ist, so werden bei dieser innigen Berührung der kleinsten Theilchen die Sauerstoffatome negativ, die Wasserstoffatome positiv elektrisch; wegen der gleichförmigen Vertheilung der Theilchen beider Substanzen aber zeigt natürlich die Verbindung keine freie Elektricität. Wenn sich nun Wasser zwischen den beiden Polen einer galvanischen Kette befindet, so wird der positive Pol auf die zunächst liegenden Wassertheilchen in der Weise wirken, daß der negative Bestandtheil angezogen und dem positiven Pole zugekehrt wird, während das abgestoßene Wasserstoffatom des ersten Wassermoleküls von dem positiven Pole abgewendet ist. Das Wassertheilchen 1, Fig. 429, wirkt aber auf das Wassertheilchen 2 in derselben Weise, wie die Polplatte auf 1; ebenso wirkt 2 auf 3 u. s. w. So kommt es denn, daß alle Wassermoleküle zwischen den beiden Polen ihr Sauerstoffatom dem positiven Pole, ihr Wasserstoffatom dem negativen Pole zukehren, ungefähr so, wie es Fig. 429 versinnlicht, wo die Kreischen Wassertheilchen darstellen, und zwar die schwarzen Hälften das Wasserstoffatom, die weißen das Sauerstoffatom. Wenn nun die Anziehung, welche der positive Pol auf das Sauerstoffatom des Wassertheilchens 1 ausübt, groß genug ist, so wird es gleichsam seinem Wasserstoffatome entrissen; dieses Wasserstoffatom verbindet sich wieder mit dem Sauerstoff des Wassertheilchens 2; der Wasserstoff von 2 verbindet sich mit dem Sauerstoff von 3 u. s. w. Auf diese Weise geht auf der ganzen Strecke zwischen beiden Polen eine beständige Zersetzung und Wiederbildung von Wasser vor sich, nur an den Polen selbst können die Bestandtheile desselben frei werden.

Fig. 429.



Gerade so wie zwischen den Polen findet auch in allen Zellen der galvanischen Kette eine Wasserzersetzung Statt.

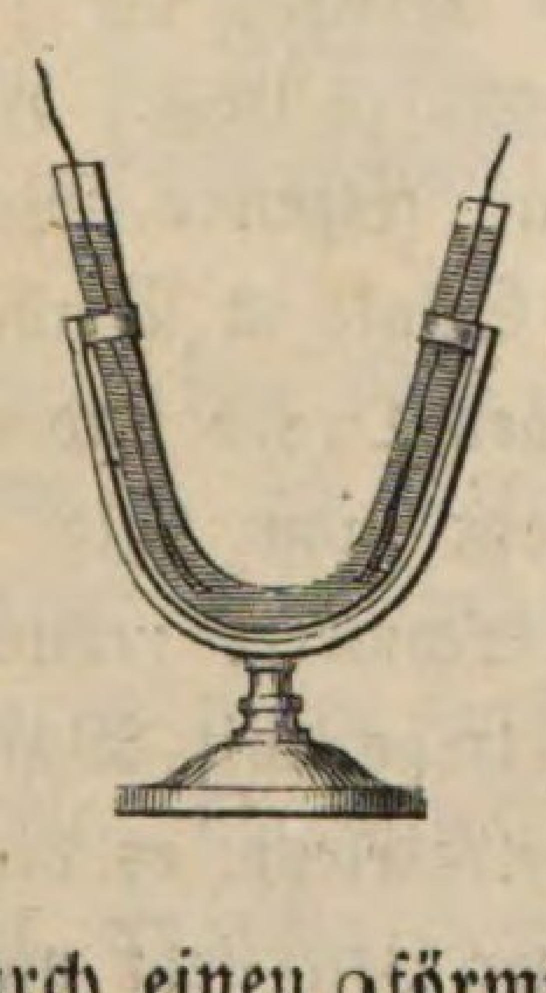
Die Oxyde werden ebenso durch die galvanische Kette zerlegt wie das Wasser. Sauerstoff erscheint am + Pole, das Radikal am — Pole. Für leicht reducirbare Metalloxyde kann man den Versuch auf folgende Weise machen: Auf ein Platinblech, welches mit dem + Pole der Säule in Verbindung ist, streut man etwas von dem trockenen pulverförmigen Oxyde und berührt dann dieses Pulver mit dem negativen Drahte, so sieht man bald an dem Ende des Drahtes kleine Metallkügelchen erscheinen. Schwerer reducirbare Oxyde müssen, besonders wenn sie pulverförmig sind, etwas mit Wasser angefeuchtet werden. Freilich wird auch das Wasser zum Theil zerlegt, es dient aber auch, um die Leitungsfähigkeit zu vergrößern; nach einiger Zeit sieht man, wenn die Säule kräftig genug ist, kleine Metallkügelchen am negativen Pole erscheinen.

Eine neue Epoche der Wissenschaft begann mit der im Jahre 1807 von Davy mit Hülfe der Säule gemachten Entdeckung der Zerlegbarkeit der Alkalien, welche man bis dahin für einfache Körper gehalten hatte. Die Alkalien und Erden wurden dadurch in die Klasse der Oxyde zurückgeführt und die Chemie mit zwei neuen metallischen Körpern, Kalium und Natrium, bereichert. Um Kali zu zerlegen, muß man eine sehr kräftige Säule anwenden. Macht man den Versuch in der oben angegebenen Weise, so sieht man zahlreiche Metallkügelchen am negativen Pole erscheinen und unter Funkensprühen wieder verschwinden. Es ist dies das Kalium, welches bei der Zerlegung des Kalis frei wird. Seine Verwandtschaft zum Sauerstoff ist aber so groß, daß es sich, mit der Luft in Berührung, sogleich wieder oxydirt; wenn es aber mit Wasser in Berührung kommt, so entzieht es diesem den Sauerstoff und entzündet das Wasserstoffgas, daher denn die Feuererscheinung. Man muß deshalb das Kalium in einer nicht sauerstoffhaltigen Flüssigkeit aufbewahren. Man gebraucht zu diesem Zwecke gewöhnlich Steinöl, welches aus Kohlenstoff und Wasserstoff zusammengesetzt ist.

Seebeck hat ein Mittel angegeben, um das durch die Säule ausgeschiedene Kalium sicherer zu sammeln. In ein Stück kaustischen Kalis, welches zersetzt werden soll, wird eine Höhlung gemacht und Quecksilber in dieselbe gegossen. Das Kali wird dann auf ein mit dem positiven Pole der Säule in Verbindung stehendes Platinstück gelegt, das negative Drahtende aber in das Quecksilber getaucht. Alsbald geht die Zersetzung vor sich, Sauerstoff wird am Platin frei, das Kalium aber verbindet sich mit dem Quecksilber zu einem ziemlich beständigen Amalgam. Durch Destillation in einer Atmosphäre von Steinöldampf kann man alsdann das Quecksilber abscheiden und das Kalium in reinem Zustande erhalten.

Auch die Salze werden durch den galvanischen Strom zerlegt, und zwar erscheint die Säure am positiven, die Basis am negativen Pole. Die Zerlegung der Salze läßt sich dem Auge auf folgende Weise sehr gut sichtbar machen. Man fülle eine Uförmig gebogene Röhre, Fig. 430, mit einer Salzlösung, die durch Malventinctur violet gefärbt ist. Taucht man nun auf der einen Seite den positiven, auf der anderen den negativen Poldraht in die Flüssigkeit, so wird sie sich am positiven Pole roth, am negativen blau färben. Vertauscht man nun die Pole, so stellt sich erst allmälig die ursprüngliche violette Färbung wieder her, dann aber erscheint Roth da, wo vor der Vertauschung der Farben Blau war, und umgekehrt.

Fig. 430.



Gießt man eine Salzlösung in zwei neben einander stehende Gefäße, die durch ein feuchtes Asbestgewebe oder durch einen ∩förmigen mit der Flüssigkeit gefüllten Heber verbunden sind, taucht man dann in das eine Gefäß den positiven, in das andere den negativen Poldraht, so geht die Zersetzung ebenfalls vor sich, und nach einiger Zeit findet sich

die Säure in dem Gefäße, in welches der positive Draht eingetaucht ist, die Basis im anderen. Selbst wenn man in das Gefäß *A*, welches den positiven Poldraht enthält, die basische Lösung, in das andere, *B*, aber die Säure gießt, so findet sich nach einiger Zeit die Säure in *A*, die Basis in *B*. Man hat diese Versuche auf mannigfache Weise abgeändert.

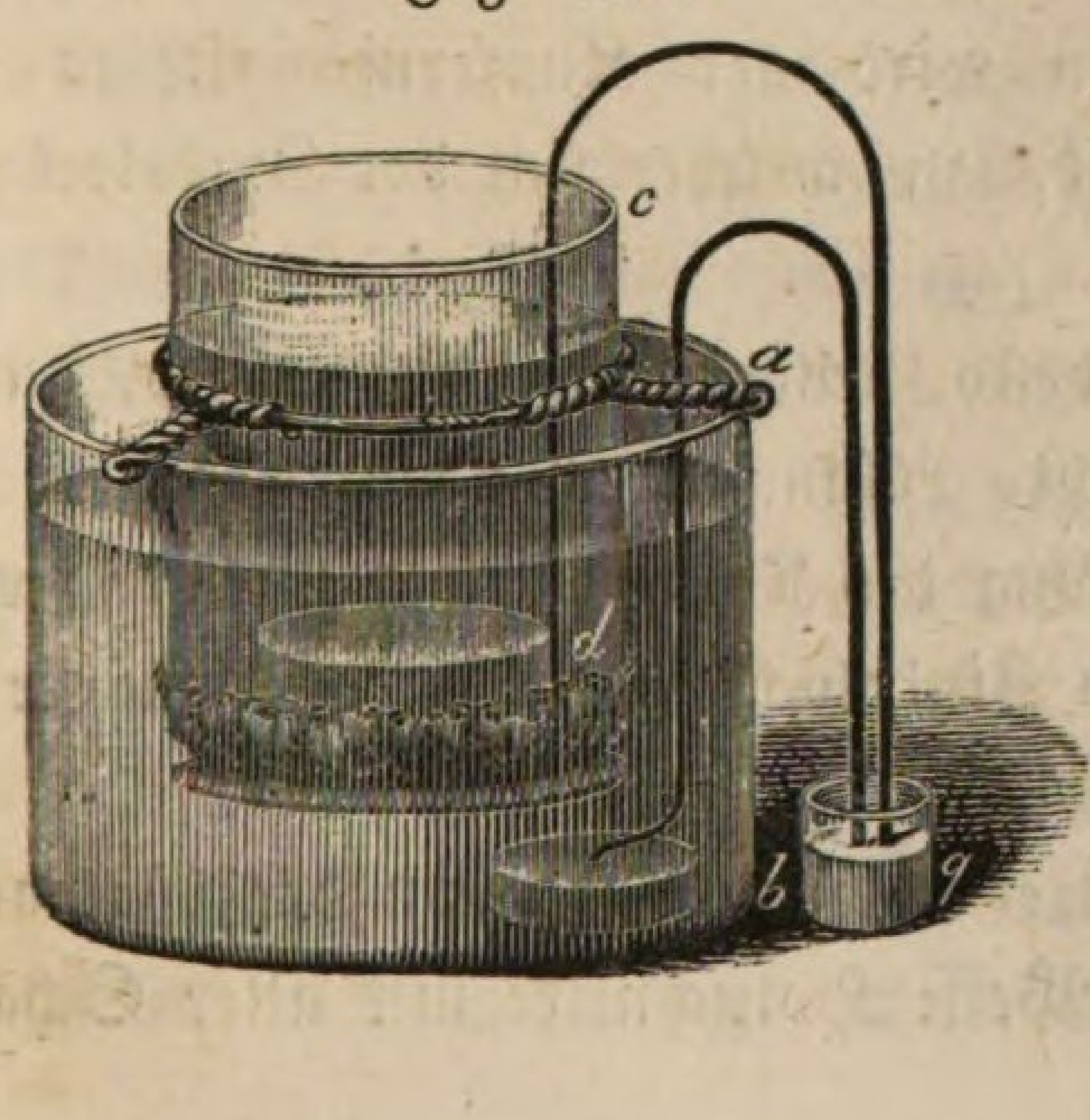
Nach Daniell's Ansicht wird hier nicht das Salz direct in Säure und Basis zerlegt, sondern nach der einen Seite wandert die metallische Grundlage der Basis, nach der anderen die Säure + Sauerstoff. Danach hätte man z. B. das schwefelsaure Natron nicht als $SO^3 + NaO$, sondern als $SO^4 + Na$ zu betrachten. Na wandert zum negativen, die hypothetische Verbindung SO^4 (Oxysulphion) zum positiven Pol. Das Oxysulphion zerfällt aber, sobald es am positiven Pole frei wird, in Sauerstoff, welcher gasförmig entweicht, und Schwefelsäure, welche in der Umgebung des + Pols in der Lösung bleibt. Am negativen Pol geht unterdessen folgender Proceß vor: Das freiwerdende Natrium oxydirt sich sogleich wieder auf Kosten des Wassers und bildet Natron, welches in der Lösung bleibt, während dafür ein Aequivalent Wasserstoff als Gas entweicht.

Ist das Metall des Salzes nicht leicht oxydirbar, so schlägt es sich auf der negativen Polplatte metallisch nieder, und es wird also kein Wasserstoff frei. Dies ist z. B. der Fall bei der galvanischen Zerlegung einer Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd; am positiven Pole entweicht Sauerstoffgas und auf der negativen Polplatte schlägt sich metallisches Kupfer nieder.

Das auf der negativen Polplatte galvanisch niedergeschlagene Kupfer läßt sich ablösen, so daß man einen mikroskopisch genauen Abdruck ihrer Oberfläche erhält; wendet man nun als negative Polplatte eine Münze, eine gestochene Kupferplatte u. s. w. an, so erhält man auf diese Weise einen kupfernen Abdruck dieser Form. — Dies Verfahren ist unter dem Namen der Galvanoplastik bekannt.

Um einen galvanoplastischen Abdruck einer metallischen Form, z. B. einer Münze zu machen, hat man sie nur als negative Polplatte eines schwach geladenen Daniell'schen oder Bunsen'schen Bechers, der positiven Polplatte gegenüber, in eine concentrirte Lösung von Kupfervitriol zu tauchen. Es ist jedoch nicht einmal nöthig, eine vom Elektromotor gesonderte Zersetzungszelle anzuwenden, indem die metallische Form selbst die Rolle des elektronegativen Metalles in der Daniell'schen Kette übernehmen kann. Fig. 431 stellt einen derartigen Apparat dar. *ab* ist ein oben offenes, etwa 6 — 8 Zoll im Durchmesser haltendes Glasgefäß. In dieses hängt ein zweites engeres Glasgefäß *cd* von oben hinein, welches unten mit einer Thierblase

Fig. 431.



zugebunden ist. Etwas über der Mitte ist um dieses engere Glasgefäß ein Draht fest herumgewunden, der in drei Arme ausläuft, welche, auf dem Rande des äußeren Glasgefäßes aufliegend, das innere tragen, so daß die Blase noch 1,5 bis 2 Zoll hoch über dem Boden des größeren Gefäßes sich befindet. Das innere Gefäß wird nun mit sehr verdünnter Schwefelsäure, das äußere mit einer concentrirten Lösung von Kupfervitriol gefüllt. In der verdünnten Schwefelsäure ruht auf einem Kreuze von Holzstäbchen ein Zinkblock, an welchen ein Kupferdraht gelöthet ist, welcher den Zinkblock mit dem Quecksilbernäpfchen *q* verbindet. Aus dem Quecksilber dieses Näpfchens geht ein zweiter Kupferdraht zu der in der Kupfervitriollösung liegenden Form, welche nothwendig aus einem Stoffe bestehen muß, der mehr elektronegativ ist als Zink.

Eine solche Form kann man sich verschaffen, wenn man von der zu vervielfältigenden Münze einen Abguß von der leichtflüssigen Rose'schen Metalllegirung macht. Noch leichter sind Formen von Wachs und Stearin zu machen. Schmilzt man Wachs oder Stearin und gießt die Flüssigkeit auf die mit einem Papierrande versehene Münze, so erhält man eine sehr schöne Form. Diese Form ist aber nicht leitend; sie wird es erst dadurch, daß man die Fläche der Form, auf welchen sich das Kupfer absetzen soll, mit einer sehr dünnen zarten Schicht von Graphit oder feiner Kupferbronze überzieht. Dieser Ueberzug, welcher mit Hülfe eines zarten Pinsels gemacht wird, benimmt der Form nichts an Reinheit und Schärfe. Die Form wird in die Kupfervitriollösung so gelegt, daß die leitend gemachte Oberfläche nach oben gekehrt ist. Der Kupferdraht braucht mit der feinen Graphitschicht der Form nur eben in Berührung zu seyn.

Derjenige Theil des Kupferdrahtes, welcher in die Lösung von Kupfervitriol eingetaucht ist, muß mit Schellack oder Siegellack überzogen seyn, weil sich sonst auch auf diesen Draht metallisches Kupfer absetzt; nur da, wo er auf die Form aufgesetzt ist, muß er metallisch seyn.

Der Strom, welcher durch den Apparat circulirt, ist nur schwach; das Kupfer setzt sich langsam auf die Kupferfläche ab, und zwar setzt es sich zunächst um den Kupferdraht an; man muß deshalb von Zeit zu Zeit den Draht an einer anderen Stelle der Form auffsetzen. Je nachdem der Strom stärker oder schwächer ist, ist in einem oder in mehreren Tagen die Kupferschicht dick genug zum Abnehmen. Bei schwächeren Strömen wird der Kupferniederschlag am gleichförmigsten; deshalb darf die Flüssigkeit, in welcher sich der Zinkblock befindet, nur schwach sauer seyn.

Je mehr Kupfer sich abgesetzt hat, desto heller wird die Vitriollösung. Wenn es nöthig ist, muß man die verbrauchte Lösung durch neue ersetzen.

Manchmal ist es vortheilhafter, die Lösung des Kupfervitriols mit der Form in das innere Gefäß, die Säure mit dem Zinkblocke aber in das äußere zu bringen.

Man hat in neuerer Zeit sehr wichtige Anwendungen von der Galvanoplastik gemacht; es ist gelungen, auf diese Weise Holzschnitte mit aller Schärfe

des Originals zu vervielfältigen, wodurch es möglich wird, von einer und derselben Figur beliebig viele Abdrücke zu erhalten, ohne daß die späteren den früheren nachstehen. (Die Holzschnitte dieses Werkes sind mit solchen Kupfertypen gedruckt.)

Eine gestochene Kupferplatte hält bekanntlich nicht sehr viele Abdrücke aus, ohne bedeutend zu verlieren; die späteren Abdrücke sind immer schlechter als die ersten; daher der Werth der sogenannten avant la lettre. Dadurch ist der Stahlstich so sehr in Aufnahme gekommen, weil eine Stahlplatte ungleich mehr Abdrücke aushalten kann. Für die Kunst ist dies von entschiedenem Nachtheile, weil die Härte dieses Materials dem Künstler sehr große technische Schwierigkeiten entgegensetzt, welche es ihm unmöglich machen, auf Stahl ein so vollendetes Kunstwerk zu liefern wie auf Kupfer. Nun hat man aber gelernt, Kupferplatten, selbst große Kupferplatten auf galvanoplastischem Wege zu vervielfältigen, und zwar so, daß die Abdrücke der Copien, deren man beliebig viele machen kann, denen der Originalplatte ganz gleich sind.

Endlich hat Kobell in München ein Verfahren angegeben, um in Tuschmanier gemalte Bilder durch Galvanoplastik zu vervielfältigen. Auf eine übersilberte Kupferplatte malt man mit einer Farbe, welche dadurch bereitet wird, daß man Oker oder Coaks mit einer Auflösung von Wachs und Terpentinöl anreibt und etwas Dammara-Firniß zusetzt. Mit dieser Farbe malt man auf die Platte so, daß die hellsten Lichter frei bleiben und die Farbe um so dicker aufgetragen wird, je dunkler der Schatten seyn soll. Sobald das Bild fertig gemalt ist, wird es mit Hülfe eines zarten Pinsels mit feingepulvertem Graphit überzogen und dann in den galvanoplastischen Apparat eingesetzt. Allmälig schlägt sich das Kupfer auf die gemalte Platte nieder und bildet eine zweite Kupferplatte, auf welcher alle Lichtpartien der ersteren eben, die Schattenpartien aber vertieft sind; diese Platte liefert nun, wie eine gestochene Kupferplatte behandelt, Abdrücke, welche einer getuschten Zeichnung ähnlich sehen.

Ebenso wie sich aus einer Auflösung von Kupfervitriol auf galvanischem Wege Kupfer am negativen Pole der Kette absetzt, setzen sich auch andere Metalle, wie Gold, Silber, Platin, aus einer geeigneten Auflösung am negativen Pole ab, und man kann auf diese Weise andere Metalle vergolden, versilbern u. s. w. Näheres darüber würde uns zu weit führen.

Chlor-, Jod- und Brommetalle werden ebenfalls durch den elektrischen Strom zersetzt, und zwar scheidet sich das Metall am negativen, Chlor, Jod und Brom am positiven Pole aus. Schon durch die allerschwächsten Ströme kann das Jodkalium zerlegt werden.

Wenn man wässerige Lösungen der Einwirkung des elektrischen Stromes unterwirft, so werden die Resultate der Zersetzung sehr häufig durch die Gegenwart des Wassers modificirt. Um die Mitwirkung des Wassers zu vermeiden, hat Faraday viele Körper durch Schmelzen in flüssigen Zustand versetzt und so der Einwirkung des Stromes unterworfen. So zerlegte er z. B. Chlorblei, Chlorsilber u. s. w., indem er sie auf eine Glasplatte legte, durch eine Wein-

geistlampe schmolz und alsdann die beiden Poldrähte in die flüssige Masse eintauchte. Wenn in das geschmolzene Chlorsilber Poldrähte von Silber eingetaucht werden, so wird am negativen Pole Silber ausgeschieden, welches sich an dem Draht ansetzt, während der andere Silberdraht durch das frei gewordene Chlor aufgelöst wird.

Ein Stück Kupfer oder Eisen wird, für sich allein in verdünnte Schwefelsäure oder in eine Kochsalzlösung getaucht, angegriffen; sobald es aber unter der Flüssigkeit mit einem mehr elektronegativen Metall, z. B. mit Zink, in Berührung gebracht wird, so bildet sich eine einfache galvanische Kette, das Kupfer oder das Eisen wird nun als das elektronegative Element nicht mehr angegriffen, dagegen wird das Zink rascher oxydirt, als es für sich allein der Fall gewesen wäre. Darauf gründet sich Davy's Versuch, durch Zinknägel den Kupferbeschlag der Schiffe zu schützen. Dasselbe Princip ist auch in Anwendung gebracht worden, um das Anfressen der eisernen Pfannen zu verhindern, in welchem Salzsole versotten wird.

Der Sauerstoff, welcher durch den galvanischen Strom an der positiven Polplatte ausgeschieden wird, hat im Augenblicke seiner Entstehung sehr stark oxydirende Eigenschaften, so daß er Verbindungen bildet, welche der freie Sauerstoff sonst nicht direct eingeht. So liefert z. B. die Elektrolyse der Salzsäure, besonders wenn ihr ein paar Tropfen Schwefelsäure zugesetzt sind, ein Gemenge freier Chlorsäure und Ueberchlorsäure, während gleichzeitig freies Chlorgas am + Pol und Wasserstoffgas am — Pol in Masse entweichen. Es haben sich also hier Chlor und Sauerstoff im status nascens direct mit einander vereinigt.

Taucht man die beiden aus Platin bestehenden Polplatten in eine Auflösung von Bleizucker, so bildet sich unter dem oxydirenden Einflusse des am positiven Pole entwickelten Sauerstoffs braunes Bleihyperoxyd, welches sich auf der positiven Polplatte absetzt.

Auf ähnliche Weise und aus demselben Grunde setzt sich am positiven Pole Manganhyperoxyd ab, wenn die Flüssigkeit aufgelöstes Manganoxydul enthält.

Das Bleihyperoxyd ist noch mehr elektronegativ als Platin, so daß eine mit Bleihyperoxyd überzogene Platinplatte sich elektronegativ gegen eine reine Platinplatte verhält. Eine Combination von Bleihyperoxyd mit Zink muß demnach einen Rheomotor geben, dessen elektromotorische Kraft noch größer ist, als die eines Bunsen'schen oder Grove'schen Bechers. Allein ein solcher Rheomotor ist sehr vergänglich. Das Wasserstoffgas, welches sich an der negativen Polplatte ausscheidet, entzieht dem Hyperoxyd einen Theil seines Sauerstoffs, so daß es in kurzer Zeit ganz verzehrt wird.

Ein ganz dünner, auf die eben angedeutete Weise erhaltener Ueberzug von Manganhyperoxyd oder Bleihyperoxyd zeigt die lebhaftesten Farben (Nobili'sche Farbenringe), welche man bereits zur Verzierung mancher Metallwaaren (z. B. Tischglocken) angewendet hat.

194 **Elektrochemische Theorie.** Die bisher besprochenen Erscheinungen

zeigen uns merkwürdige Beziehungen zwischen den chemischen und elektrischen Kräften. Schon früher hatte man unbestimmt vermuthet, daß bei den chemischen Erscheinungen elektrische Kräfte thätig seyn möchten; man ging jedoch erst näher auf diese Vorstellung ein, als die Wasserzersetzung durch die Volta'sche Säule bekannt geworden war; namentlich waren es Davy und Berzelius, welche dieselbe ausbildeten; sie stellten die elektrochemische Theorie auf, nach welcher die Grundursache der chemischen Verbindungen in einer elektrischen Anziehung zu suchen ist. Wenn es auch noch nicht vollständig bewiesen ist, daß chemische Affinität und elektrische Anziehung identisch sind, so muß doch zugegeben werden, daß diese Theorie als ein gemeinsames Band viele Thatsachen auf eine Weise verknüpft, welche der Erfahrung keineswegs widerspricht.

So wie Zink und Kupfer, in Berührung gebracht, entgegengesetzt elektrisch werden, so werden, nach der elektrochemischen Theorie, die Atome je zweier Elemente entgegengesetzt elektrisch, wenn sie mit einander in Berührung kommen; kurz, alle Elemente sind nach der oben angegebenen Bedeutung Glieder der Spannungsreihe. Die äußersten Glieder dieser vollständigen Spannungsreihe sind Sauerstoff und Kalium, und zwar bildet Sauerstoff das negative, Kalium das positive Ende. Folgendes ist die vollständige Spannungsreihe:

—

Sauerstoff
Schwefel
Selen
Tellur
Stickstoff
Chlor
Brom
Jod
Fluor.
Phosphor
Arsenik
Kohlenstoff
Chrom
Molybdän
Bor
Vanadin
Wolfram
Antimon
Tantal
Titan
Silicium
Osmium
Gold
Iridium

Iridium
Rhodium
Platin
Palladium
Quecksilber
Silber
Kupfer
Uran
Wismuth
Blei
Cerium
Lanthan
Yttrium
Kobalt
Nickel
Eisen
Cadmium
Zink
Wasserstoff
Mangan
Zirconium
Aluminium
Thorium
Beryllium

Beryllium	Barium
Magnesium	Lithium
Calcium	Natrium
Strontium	Kalium
Barium	+

In dieser Reihe sind alle einfachen Stoffe enthalten, und jedem ist seine Stelle angewiesen, obgleich in dieser Beziehung noch manche Zweifel herrschen und die Stellung der meisten Körper in der Spannungsreihe nur ungefähr, aber nicht genau bestimmt ist. Bei den wenigsten Körpern ist diese Stellung durch directe Versuche ermittelt; für die meisten hat man sie aus ihrem chemischen Verhalten zu erschließen gesucht.

Nach der elektrochemischen Theorie sind die Atome der Elemente nicht an und für sich elektrisch, sie werden es erst in Berührung mit anderen, und so kommt es denn, daß ein und derselbe Körper bald positiv, bald negativ elektrisch werden kann. So bildet z. B. Schwefel in Verbindung mit Sauerstoff das elektropositive, mit Wasserstoff das elektronegative Element.

Wir haben gesehen, daß zwei verschiedenartige Metallplatten, in Berührung gebracht, entgegengesetzt elektrisch werden, daß aber der größte Theil der entwickelten Elektricitäten an der Berührungsfläche gebunden bleibt; so auch bei chemischen Verbindungen. Wenn z. B. ein Sauerstofftheilchen und ein Wasserstofftheilchen in Berührung kommen, wird das erstere —, das letztere + elektrisch, die beiden Elektricitäten ziehen sich nun an und binden sich wegen der großen Nähe fast vollständig. Wenn aber auch noch etwas freie $+E$ auf dem einen und $-E$ auf dem anderen Theilchen ist, so kann die chemische Verbindung doch durchaus keine Zeichen freier Elektricität geben, weil die positiven und negativen Theilchen gleichförmig vertheilt sind und, wo man auch den Körper berühren mag, eben so viel positive als negative Theilchen berührt.

Zunächst verbinden sich die einfachen Stoffe, immer je zwei, zu binären Verbindungen. Die zusammengesetzten Körper, wie die Sauerstoff-, Schwefel- und Chlorverbindungen, zeigen unter sich ein ähnliches Verhalten wie die einfachen Stoffe; diejenigen binären Verbindungen der einfachen Elemente, Oxyde, Sulfüre, Chlorüre u. s. w., welche sich durch negativ elektrische Eigenschaften charakterisiren und zugleich fähig sind, Verbindungen einer höheren Ordnung einzugehen, werden Säuren genannt; diejenigen, welche in ihren weiteren Verbindungen die Rolle des elektropositiven Bestandtheils übernehmen, nennt man Salzbasen.

Der Charakter einer Säure wird sich im Allgemeinen um so stärker ausdrücken, je näher ihre Elemente dem negativen Ende der Spannungsreihe liegen; daher ist die Schwefelsäure die stärkste aller Säuren. Der Sauerstoff bildet Säuren mit den in der oben mitgetheilten Spannungsreihe zu oberst stehenden Elementen, Basen mit den am positiven Ende stehenden Elementen, und in der That ist Kali die stärkste aller Basen.

Wenn ein und derselbe Körper sich in mehreren Verhältnissen mit Sauerstoff verbindet, so wird die Verbindung um so mehr elektronegativ werden, sie

wird um so weniger basische und um so mehr saure Eigenschaften annehmen, je mehr das elektronegative Element, der Sauerstoff, vorherrscht. So bildet 1 Aeq. Mangan, verbunden mit 1 Aeq. Sauerstoff, das Manganoxyd, welches basische Eigenschaften hat, während 1 Aeq. Mangan + 3 Aeq. Sauerstoff die Mangansäure bilden.

Die elektrochemische Theorie reicht in ihrem jetzigen Umfange freilich noch nicht aus, um alle chemischen Erscheinungen vollständig zu erklären; aber die auf sie gegründete Classification der Körper stimmt mit dem Verhalten derselben recht gut überein und ist sehr geeignet, von den chemischen Gesetzen eine klare Ansicht zu geben.

Das elektrolytische Gesetz. Es kann wahrscheinlich gar kein, wenig- 195
stens kein einigermaßen starker elektrischer Strom durch eine Flüssigkeit hindurchgehen, ohne daß dieser Durchgang von einer chemischen Zersetzung begleitet ist. In jeder Zelle eines jeden galvanischen Apparates findet eine solche Zersetzung Statt, so lange die Kette geschlossen bleibt, und Faraday hat gezeigt, daß die Quantität des elektrischen Stromes der Zersetzung in jeder einzelnen Zelle proportional ist.

Daß zwischen der Leitung des elektrischen Stromes durch Flüssigkeiten und ihrer Zersetzung eine innige Beziehung stattfindet, ist wohl nicht zu verkennen, ja man kann geradezu behaupten, daß der Uebergang der Elektricität durch die chemische Zersetzung vermittelt wird. In jeder Zelle geht der positive Strom vom Zink aus durch die Flüssigkeit zum Kupfer, in derselben Richtung wandern auch die Wasserstoffpartikelchen fort; sie sind die Träger der positiven Elektricität, welche durch sie zu der Kupferplatte übergeführt wird. In der That haben wir gesehen, daß den Grundsätzen der elektrochemischen Theorie zufolge in jedem Wasseratome die Elemente gerade deshalb so fest zusammengehalten werden, weil Sauerstoff und Wasserstoff, in Berührung gebracht, entgegengesetzt elektrisch werden, und weil diese entgegengesetzten Elektricitäten der Wasserelemente sich gegenseitig binden. Indem ein Wasserstoffatom von seinem Sauerstoff getrennt wird, so wird auch alle seine gebundene Elektricität frei; sie wird aber, wenn der Wasserstoff sich dagegen auf der anderen Seite wieder mit einem anderen Sauerstofftheilchen verbindet, sogleich wieder gebunden, und so führt jedes Wasserstoffatom seine gebundene positive Elektricität fort, und an dem negativen Pole wird mit dem Wasserstoffe zugleich auch seine positive Elektricität frei.

Während gewöhnliches käufliches Zink, in verdünnte Schwefelsäure getaucht, rasch aufgelöst wird, bleibt chemisch reines Zink oder amalgamirtes Zink in derselben Flüssigkeit unangegriffen. Construirt man nun eine galvanische Kette mit chemisch reinen oder mit amalgamirten Zinkplatten, so kann begreiflicher Weise in einer solchen Kette keine Wasserzersetzung stattfinden, so lange sie nicht geschlossen ist. Wird aber die Kette geschlossen, so beginnt augenblicklich die Wasserzersetzung in jeder Zelle; es wird jedoch nur gerade so viel Wasser zersetzt und Zink aufgelöst, als zur Leitung des circulirenden Stromes nöthig ist; die Menge des aufgelösten Zinks muß also in einem ganz bestimmten Verhältnisse

zu diesem Strome stehen. Faraday wendete den Strom einer solchen Kette zur Wasserzersetzung an und bestimmte genau die in einer gegebenen Zeit entwickelte Menge von Knallgas. Es fand sich nun, daß für jeden Gewichtstheil Wasserstoffgas, welcher zwischen den Poldrähten oder vielmehr den Polplatten frei wurde, in jeder Zelle 32,3 Gewichtstheile Zink aufgelöst worden waren. Nun aber verhalten sich die Gewichte der chemischen Aequivalente von Wasserstoff und Zink zu einander wie 12,48 zu 403,32 oder wie 1 zu 32,3. Für jedes Aequivalent Wasserstoff also, welches in der Zerlegungszelle entwickelt wird, muß in jeder Zelle der Kette 1 Aeq. Zink aufgelöst werden.

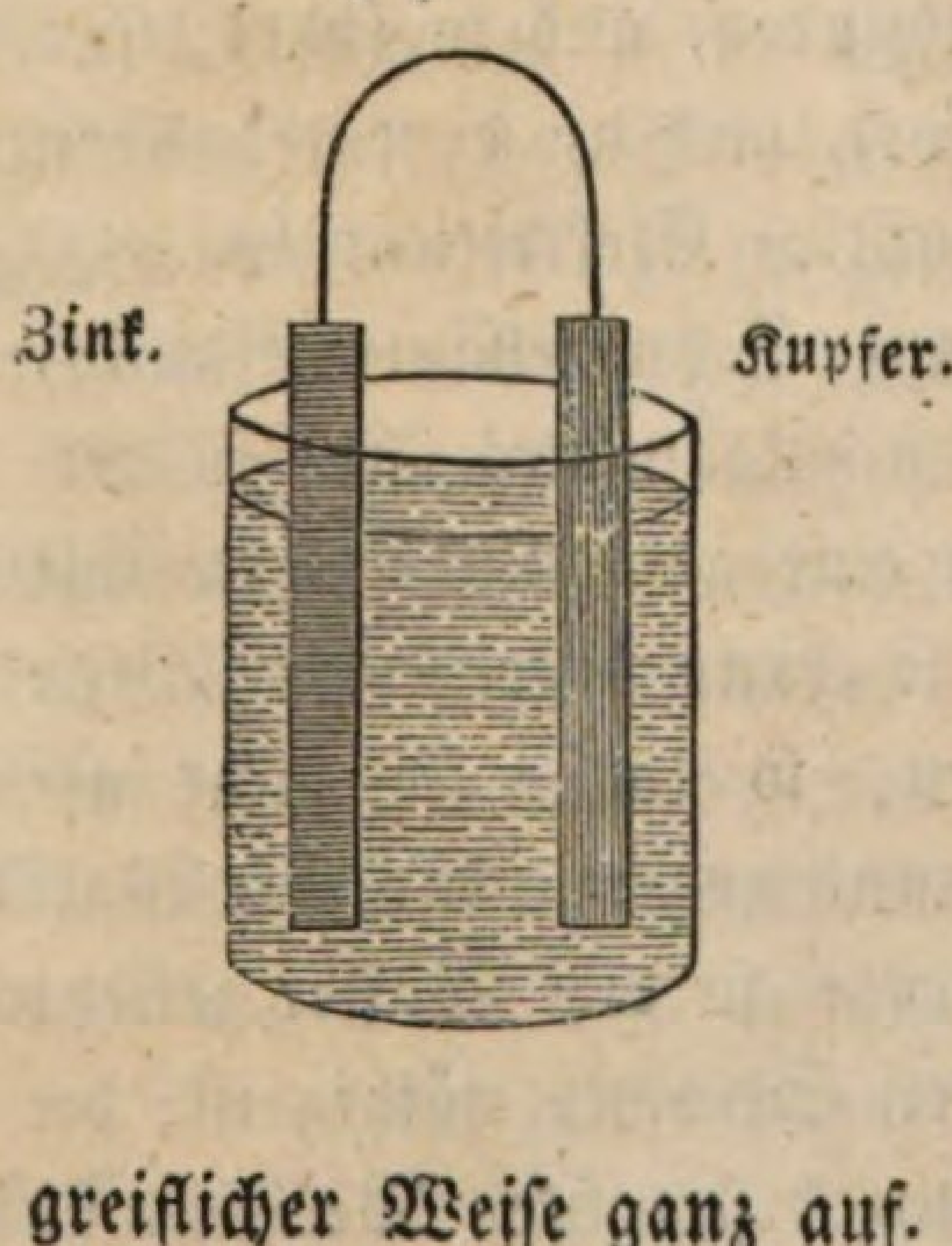
Wenn derselbe Strom durch vier Zerlegungszellen geleitet wird, von denen die erste Wasser, die zweite Chlorsilber, die dritte Chlorblei, die vierte Chlorzinn, alle aber im flüssigen Zustande, enthält, so verhalten sich die Quantitäten Wasserstoffgas, Silber, Blei und Zinn, welche an den vier negativen Polen ausgeschieden werden, wie 1 : 108 : 103,6 : 57,9, während an den positiven Polen Sauerstoffgas und Chlor, und zwar im Verhältnisse von 8 : 35,4, ausgeschieden werden. Aehnliche Thatsachen sind für viele andere zusammengesetzte Körper dargethan worden.

Es ergiebt sich aus diesen Thatsachen, daß die chemischen Aequivalente diejenigen relativen Gewichte der Stoffe bezeichnen, welche, in Berührung mit einem und demselben Elemente, eine gleich starke elektrische Polarität annehmen.

196 **Theorie der constanten Ketten.** Die gewöhnlichen Volta'schen Ketten, in welchen nur eine Flüssigkeit angewendet wird, geben, wie schon bemerkt wurde, im ersten Augenblicke einen ungemein kräftigen Strom, der aber sehr rasch abnimmt, während in den Becquerel'schen Ketten, dem Daniell'schen, dem Grove'schen und Bunsen'schen Apparate der Strom mit unveränderter Stärke fortdauert. Jetzt, wo wir die chemischen Erscheinungen in der Kette kennen gelernt haben, können wir uns davon Rechenschaft geben, warum in diesen Apparaten der Strom constant bleibt, in jenen aber so rasch abnimmt.

In ein Gefäß, Fig. 432, welches mit einer Lösung von Zinkvitriol gefüllt ist, werde eine Zink- und eine Kupferplatte eingetaucht, welche oben durch einen Kupferdraht verbunden sind. Auch hier wird anfangs ein ziemlich kräftiger Strom entstehen, der bald abnimmt und endlich ganz aufhört. Der Grund dieses Aufhörens ergiebt sich bald, wenn man den Vorgang der Zersetzung betrachtet; das Zinkoxyd der Lösung wird nämlich zersetzt, der Sauerstoff geht an die Zinkplatte, um neues Oxyd zu bilden, während auf der anderen Seite sich metallisches Zink auf der Kupferplatte absetzt; nach einiger Zeit hat sich die Kupferplatte ganz mit Zink überzogen, und nun hört der Strom begreiflicher Weise ganz auf. Das Kupfer ist jetzt gar nicht mehr mit der Flüssig-

Fig. 432.



keit in Berührung, Zink aber befindet sich auf beiden Seiten des Kupfers und auf beiden Seiten der Flüssigkeit; das Kupfer wird da, wo es an die Zinkplatte angelöthet ist, negativ erregt, diese Erregung aber kann keinen Strom veranlassen, weil der neu entstandene Zinküberzug einen ganz gleichen entgegengesetzten Strom erregt.

Nehmen wir nun verdünnte Schwefelsäure, statt der Lösung des Zinkoxyds, so wird das Wasser der sich zwischen der Zink- und Kupferplatte befindlichen Flüssigkeit zersetzt; statt daß sich im vorigen Falle Zink an der Kupferplatte absetzte, wird nun hier Wasserstoffgas frei, die Kupferplatte überzieht sich mit einer Schicht von Wasserstoff, welcher aber mit dem Kupfer nicht in so innige Berührung kommt, wie im vorigen Falle, und also auch die Flüssigkeit nicht so vollständig von der Berührung mit der Kupferplatte abhalten kann, wie es dort der Fall war. Ein gänzliches Aufhören des Stromes ist also hier nicht möglich, dennoch aber veranlaßt diese Ausscheidung des Wasserstoffs, welcher, nach Buff's Versuchen, in der Spannungsreihe noch unter dem Zinke steht, in ganz ähnlicher Weise eine Schwächung des Stromes, wie es dort die Ablagerung des Zinks gethan hatte.

Ist somit die Ursache richtig erkannt, welche die Schwächung des Stromes in gewöhnlichen Ketten veranlaßt, so ergiebt sich leicht, wie eine solche Schwächung vermieden werden kann; man hat nämlich nur eine Vorrichtung zu treffen, durch welche die Abscheidung des Wasserstoffs an den Kupfer- oder Platinplatten verhindert wird, so daß diese Platten stets in derselben Weise mit der Flüssigkeit in Berührung bleiben.

In der Becquerel'schen und Daniell'schen Kette setzt sich nicht Wasserstoff, sondern metallisches Kupfer an die Kupferplatte an, und somit bleibt stets eine reine Kupferoberfläche mit der Flüssigkeit in Berührung. In der Grove'schen Batterie aber ist das Platin, in der Bunsen'schen die Kohle von einer Schicht von Salpetersäure umgeben; diese Salpetersäure aber verhindert die Abscheidung des Wasserstoffs am Platin oder der Kohle, denn die ausgeschiedenen Wasserstofftheilchen werden im Momente ihres Entstehens auch sogleich wieder oxydirt, indem sich salpetrige Säure bildet.

Es ist wohl hier der passendste Ort, Einiges über die verschiedenen Theorien 197
zu sagen, welche man zur Erklärung der elektrischen Erscheinungen der Säule aufgestellt hat, da diese Theorien gerade jetzt den Gegenstand lebhafter Erörterungen zwischen den verschiedenen Gelehrten bilden.

Die älteste Theorie ist die von Volta aufgestellte Contacttheorie, nach welcher die Berührung verschiedenartiger Metalle die einzige Quelle der Elektricität der Säule ist. Volta hatte vorzugsweise die Spannungswirkungen der Säule studirt, und diese finden auch durch seine Theorie die befriedigendste Erklärung. Die chemischen Erscheinungen ließ er unberücksichtigt, ohne Zweifel, weil er sie entweder gar nicht, oder doch nur höchst unvollständig kannte; daher kam es auch, daß er die Rolle, welche die Flüssigkeiten in der Kette spielen, nicht gehörig würdigte.

Nachdem nun die chemischen Wirkungen der Säule bekannt und genauer untersucht worden waren, konnte die Volta'sche Contacttheorie nicht mehr genügen, sie mußte also entweder berichtigt und erweitert werden, um auch die neu entdeckten Thatsachen zu umfassen, oder man mußte sie ganz verlassen und eine ganz neue Hypothese aufstellen. Beide Wege sind verfolgt worden, und zwar beide von ausgezeichneten Physikern.

Die Gegner der Contacttheorie, unter denen wohl Faraday vor allen Anderen zu nennen ist, betrachten die chemische Wirkung, welche die Flüssigkeiten auf die Metalle ausüben, als die Quelle des elektrischen Stromes der Kette.

Durch seine theoretischen Ansichten wurde Faraday auch veranlaßt, eine neue Nomenclatur einzuführen; so nannte er die Pole »Elektroden«, Wege, auf welchen der elektrische Strom in die zu zerlegende Flüssigkeit eintritt, und zwar nannte er den positiven Pol Anode, den negativen Kathode. Die Bestandtheile des Elektrolyts (des zersetzten Körpers) heißen, nach Faraday, »Jonen«, und zwar ist das Kation dasjenige Element, welches an der Kathode, Anion dagegen dasjenige, welches an der Anode ausgeschieden wird.

Es kann nicht überraschend erscheinen, daß eine Meinungsverschiedenheit über die Quelle der Elektricität der Kette herrscht, wenn man bedenkt, wie wenig uns von dem eigentlichen Wesen der Elektricität bekannt ist. Wissen wir doch auch über die Entstehung der Elektricität durch Reibung kaum etwas mehr als die einfache Thatsache! Daß in Beziehung auf den Galvanismus eine Meinungsverschiedenheit entstand, liegt offenbar darin, daß Volta den Einfluß des Chemismus übersehen hatte. Dieser Mangel oder vielmehr diese Einseitigkeit konnte nicht lange unbemerkt bleiben; indem aber viele Gelehrte sich bemühten, die Wichtigkeit dieses Einflusses nachzuweisen, verfielen sie zum Theil in das entgegengesetzte Extrem, sie schrieben dem Chemismus Alles zu, sie berücksichtigten die wohlerwiesenen Thatsachen, welche die Basis der Contacttheorie ausmachen, gar nicht mehr, ja einige ließen sich sogar verleiten, die Volta'schen Fundamentalversuche in Zweifel zu ziehen oder, um sie zu erklären, die Oxydirbarkeit der edlen Metalle zu Hülfe zu nehmen.

Die Anhänger der beiden Ansichten waren eifrigst bemüht, Beweise für die Richtigkeit ihrer Meinung beizubringen, und diesen Bemühungen verdanken wir großentheils die vielfachen Erweiterungen, welche die Lehre vom Galvanismus erfahren hat. Vor Allen gebührt Fechner das Verdienst, daß er die Richtigkeit der Volta'schen Fundamentalversuche über jeden Zweifel erhoben und die Ansichten über die Elektricitätserregung verschiedener Metalle berichtigt hat. Faraday dagegen hat nachgewiesen, daß galvanische Ströme auch ohne Berührung heterogener Metalle entstehen können, daß die chemische Zersetzung der Flüssigkeit der Säule der Quantität des elektrischen Stromes proportional ist, daß also diese Zersetzung im innigsten Zusammenhange mit der Bildung des Stromes in der hydro-elektrischen Kette stehe.

Da nun aber eine Theorie des Galvanismus wo möglich alle Erscheinun-

gen der Kette umfassen muß, so möchte die Wahrheit wohl schwerlich bei den Extremen der beiden Parteien zu suchen seyn. Am besten möchte wohl für den jetzigen Standpunkt der Wissenschaft eine modificirte Contacttheorie passen, wie sie oben vorgetragen wurde; denn auf diese Weise lassen sich die verschiedenen Erscheinungen der Kette am besten unter einem gemeinsamen Gesichtspunkte zusammenfassen.

Magnetische Wirkungen des galvanischen Stromes. Schon 198
lange wußte man, daß unter Umständen kräftige elektrische Ladungen die Magnetnadel afficiren können; man hatte z. B. beobachtet, daß die Compaßnadeln auf Schiffen, welche vom Blitze getroffen worden waren, ihre Eigenschaft verloren, den Weg des Fahrzeugs zu bezeichnen; mehrere Physiker versuchten, solche Erscheinungen durch die Entladung von Leidner Flaschen hervorzubringen, und in der That war es ihnen auch gelungen, den magnetischen Zustand sehr kleiner Nadeln zu verändern, entweder indem sie den Funken in der Nähe der Nadel überschlagen, oder indem sie den Entladungsschlag durch die Nadel selbst gehen ließen. Alle diese Versuche aber gaben keine regelmäßigen Resultate, und man begnügte sich mit der Annahme, der elektrische Schlag wirke auf die Magnetnadel ungefähr so wie der Schlag eines Hammers. Später machte man neue Versuche mit der galvanischen Elektricität, welche eben so wenig zu einem Resultate führten. Im Jahre 1820 endlich fand Oersted, Professor in Kopenhagen, ein Mittel, die Elektricität sicher und beständig auf einen Magneten einwirken zu lassen. Er eröffnete dadurch den Gelehrten aller Länder ein neues weites Feld der Forschung, und nie vielleicht sah man in kurzer Zeit die Wissenschaft mit so viel neuen Wahrheiten bereichert.

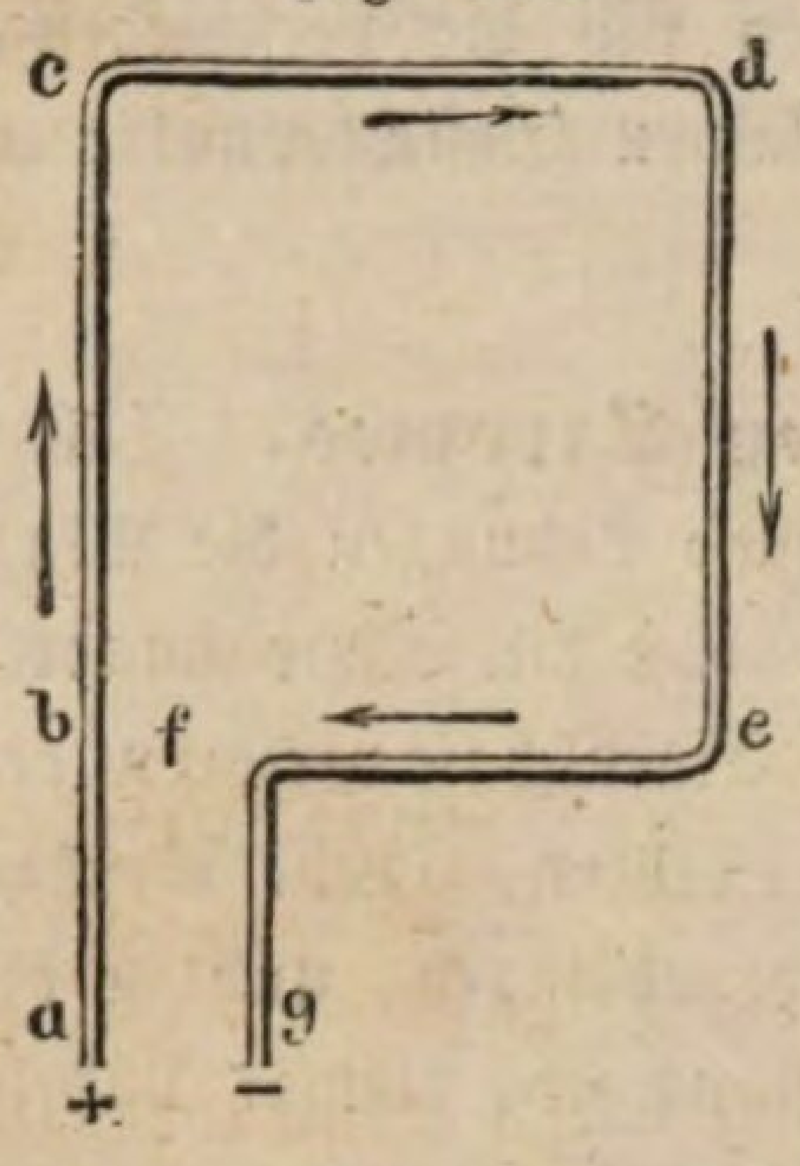
Damit die Elektricität auf den Magnetismus wirke, muß sie im Zustande der Bewegung seyn. Die ruhende Elektricität im Zustande starker Spannung wirkt nicht auf den Magneten, wohl aber ein continuirlicher elektrischer Strom.

In der That, wenn man dem Schließungsdrahte einer Säule, während der elektrische Strom hindurchgeht, eine frei aufgehängte Magnetnadel nähert, so wird sie abgelenkt. Dies war der erste Versuch Oersted's, und es ist in der That zu bewundern, daß bei den vielen Versuchen, die man mit der Säule anstellte, nicht schon längst zufällig eine Beobachtung dieser Art gemacht worden war.

Den Fundamentalversuch über die Einwirkung eines galvanischen Stromes auf die Nadel kann man auf folgende Weise anstellen: Ein etwas starker Kupferdraht wird so gebogen, daß er ein Quadrat bildet, dessen Seite etwa 8 bis 10 Zoll lang seyn kann; die beiden Enden des Drahtes *a* und *g*, Fig. 433 (s. f. S.), verbinde man mit den Polen eines einfachen Volta'schen Elementes, und befestige ihn so, daß die Ebene des Quadrats in die Ebene des magnetischen Meridians fällt. Nehmen wir an, das Drahtende *ab* sey mit dem positiven Pole verbunden, so circulirt der Strom in der Weise, wie es die Pfeile andeuten. Von *b* bis *c* steigt er auf, von *c* bis *d* läuft er horizontal in der Richtung von Süden nach Norden im magnetischen Meridiane fort, von *d* bis *e*

steigt er nieder und bewegt sich endlich wieder in horizontaler Linie von Norden nach Süden in dem Drahtstücke *ef*.

Fig. 433.



Hält man nun eine Magnetnadel gerade über das Drahtstück *cd*, so würde sie, wenn keine Einwirkung des Stromes auf die Nadel stattfände, mit dem Drahte *cd* parallel bleiben; der Strom aber lenkt die Nadel ab und zwar so, daß der Südpol westlich vom magnetischen Meridiane zu liegen kommt. Hält man aber die Nadel unter das Drahtstück *cd*, so wird das nach Norden gekehrte Ende der Nadel nach Westen abgelenkt.

Am Drahtstücke *ef*, in welchem sich der Strom in einer Richtung bewegt, welche mit der des Stromes in *cd* parallel, aber entgegengesetzt ist, findet die umgekehrte Wirkung Statt; wenn die Nadel nämlich gerade über *ef* gehalten wird, findet eine westliche, wenn sie darunter gehalten wird, eine östliche Ablenkung des Nordendes der Nadel Statt.

Die Richtung, nach welcher die Nadel abgelenkt wird, läßt sich jederzeit durch folgende von Ampère aufgestellte Regel bestimmen:

Man denke sich in den Draht eine kleine menschliche Figur so eingeschaltet, daß der positive Strom bei den Füßen ein- und am Kopfe austritt; wenn nun diese Figur ihr Gesicht der Nadel zukehrt, so ist der Nordpol der Nadel (das Nordende) immer nach der linken Seite hin abgelenkt.

In dem Drahtstücke *cd* liegt die Figur wagerecht, den Kopf nach Norden, die Füße nach Süden gekehrt. Wird die Nadel über den Draht gehalten, so muß die Figur auf dem Rücken liegen, wenn ihr Gesicht der Nadel zugekehrt seyn soll; bei dieser Lage der Figur ist ihre linke Seite die östliche. Wird die Nadel unter den Draht gehalten, so muß die Figur das Gesicht nach unten kehren, und nun wird ihre linke Seite die westliche.

Für das Drahtstück *ef* sind die Füße der Figur nach Norden, der Kopf nach Süden gekehrt; wenn die Figur auf dem Rücken liegt, ist also die linke Seite die westliche, wenn sie auf dem Leibe liegt, die östliche.

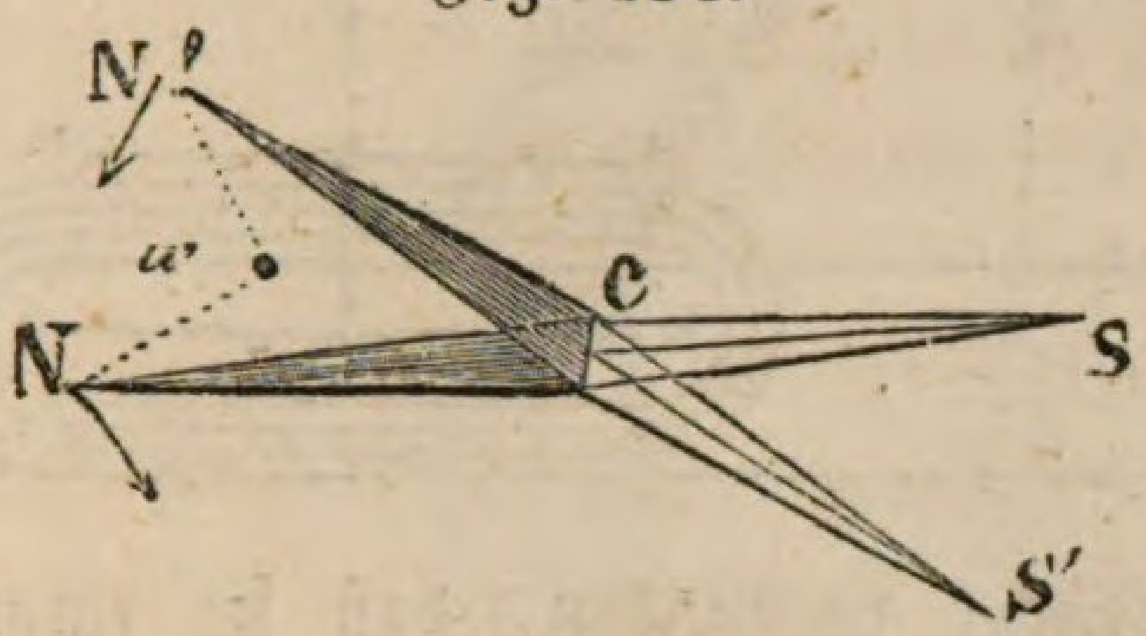
Wenn ein in der Richtung des magnetischen Meridians sich bewegender horizontaler Strom allein auf die Nadel wirkte, so würde sie sich rechtwinklig auf den magnetischen Meridian stellen; außer dem Strome wirkt aber auch noch der Erdmagnetismus, der die Nadel in den Meridian zurückzudrehen strebt. Unter dem Einflusse dieser beiden Kräfte wird also die Nadel eine Zwischenlage annehmen, sie wird mit dem magnetischen Meridiane einen Winkel machen, der um so größer wird, sich also einem rechten um so mehr nähert, je größer die Stromkraft im Vergleiche zur magnetischen Erdkraft ist.

Auch der vertikal gerichtete Strom in *bc* und *de* wirkt ablenkend auf die Nadel, und zwar findet man die Richtung der Ablenkung ebenfalls nach der

Ampère'schen Regel. Man denke sich nur die vertikal stehende Figur dem Nordende zugewendet, so muß sich dieses Nordende nach der Linken drehen. Dabei ist aber nicht zu vergessen, daß für einen aufsteigenden Strom die Figur auf den Füßen, für einen niedergehenden auf dem Kopfe steht.

Aus dieser Ampère'schen Regel folgt, daß ein und derselbe vertikale Strom das Nordende einer Nadel bald anzieht, bald abstößt, je nachdem dieser Pol sich auf der einen oder anderen Seite des Drahtes befindet. In Fig. 434 stelle *NS* eine horizontale Nadel, von oben gesehen, dar, *N* sey das Nordende der Nadel, *w* sey ein vertikaler Draht, der natürlich, von oben gesehen, als Punkt verkürzt erscheint. Geht nun ein positiver Strom von unten nach oben durch den Draht, so hat man sich die Figur aufrecht zu denken; wenn aber

Fig. 434.



diese aufrechte Figur nach *N* hinschaut und der Pol *N* in Beziehung auf diese Figur nach der Linken gedreht wird, also so wie es der Pfeil andeutet, so wird die Nadel offenbar von dem Drahte abgestoßen. Befände sich aber die Nadel in *N'S'*, so würde die Nadel offenbar von dem Drahte angezogen.

Stellt man die Wirkungen zusammen, welche die Stromstücke *ab*, *cd*, *de* und *ef* (Fig. 433) auf eine Nadel ausüben, welche sich innerhalb des Raumes *bcdef* befindet, so ergiebt sich, daß alle die Nadel in gleichem Sinne abzulenken streben, und zwar läßt sich in diesem Falle das Gesetz der Ablenkung in folgender Weise ausdrücken: das Südende der Nadel wird nach der Seite hin abgelenkt, von welcher aus betrachtet der Strom die Nadel in gleicher Richtung umkreist, in welcher sich der Zeiger einer Uhr bewegt.

Dies Gesetz gilt natürlich auch für den Fall, daß der Strom in einem Kreise um die Nadel herumgeführt wird.

Bringt man die Nadel über das Stromstück *cd*, so wird das Nordende derselben nach derselben Seite hin abgelenkt, wie das Südende einer innerhalb *bcdef* befindlichen Nadel. Davon hat man bei der Construction des Multiplicators Anwendung gemacht, den wir sogleich näher betrachten wollen.

Der Multiplicator. Kurz nachdem Oersted die wichtige Entdeckung 199
gemacht hatte, daß der elektrische Strom, an einer Magnetnadel vorbei oder um dieselbe herumgeführt, eine Ablenkung aus dem magnetischen Meridian bewirke, construirte gleichzeitig Poggendorff und Schweigger ein Instrument, welches, unter dem Namen Multiplicator oder Galvanometer bekannt, den Zweck hat, schwache galvanische Ströme dadurch merklich zu machen, daß sie durch eine große Anzahl von Drahtwindungen vielmal um die Nadel herumgeführt werden, wie dies in Fig. 435 (s. f. S.) schematisch angedeutet ist.

Damit die Nadel möglichst frei beweglich sey, ist sie nicht auf eine Spitze gesetzt, sondern an einem Coconfaden aufgehängt.

Nobili hat den Multiplicator dadurch bedeutend empfindlicher gemacht

daß er statt einer einzigen Magnetnadel ein sogenanntes **astatisches Nadelpaar** in Anwendung brachte, wie dies Fig. 436 schematisch dargestellt ist. Es

Fig. 435.

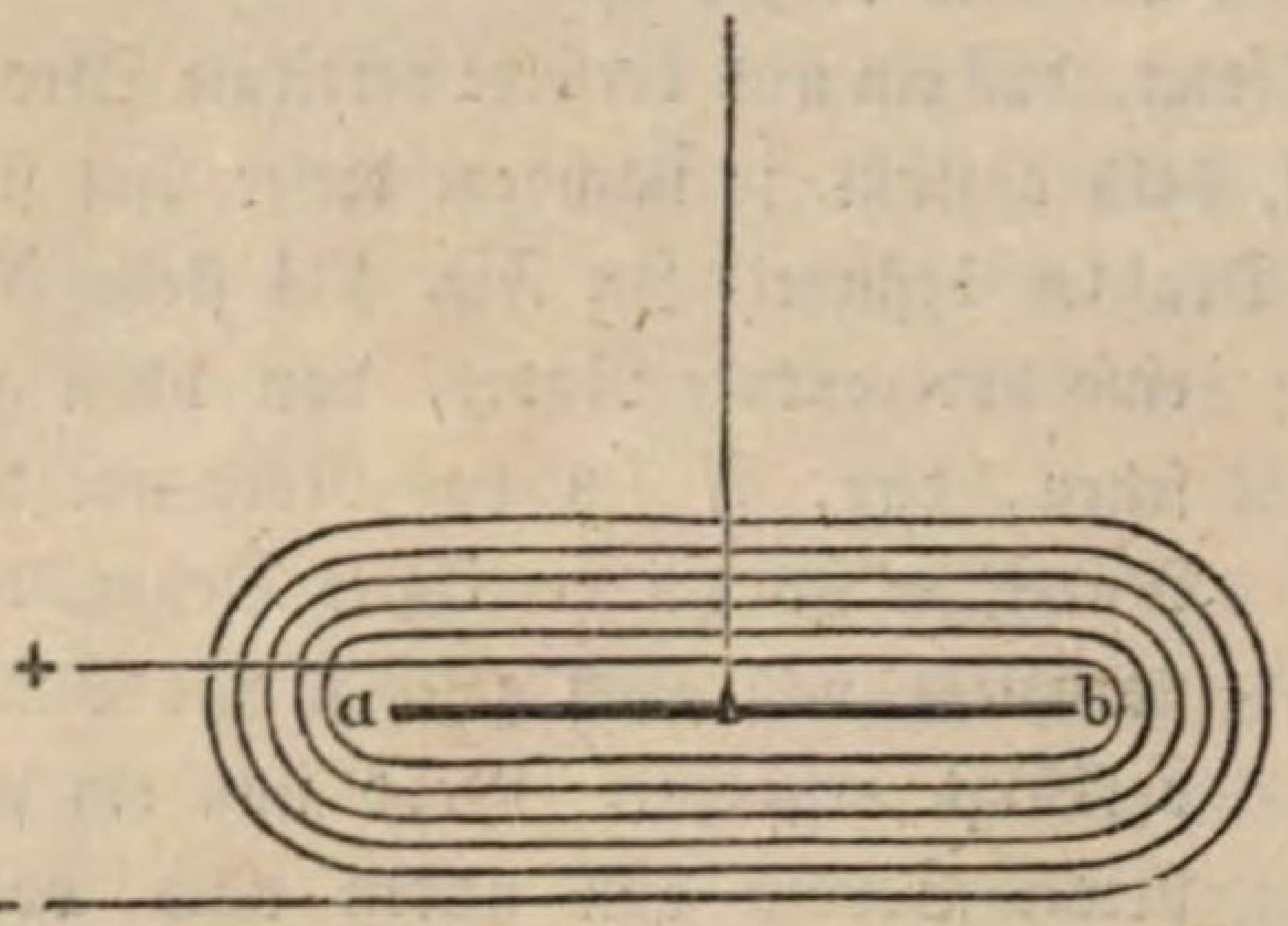
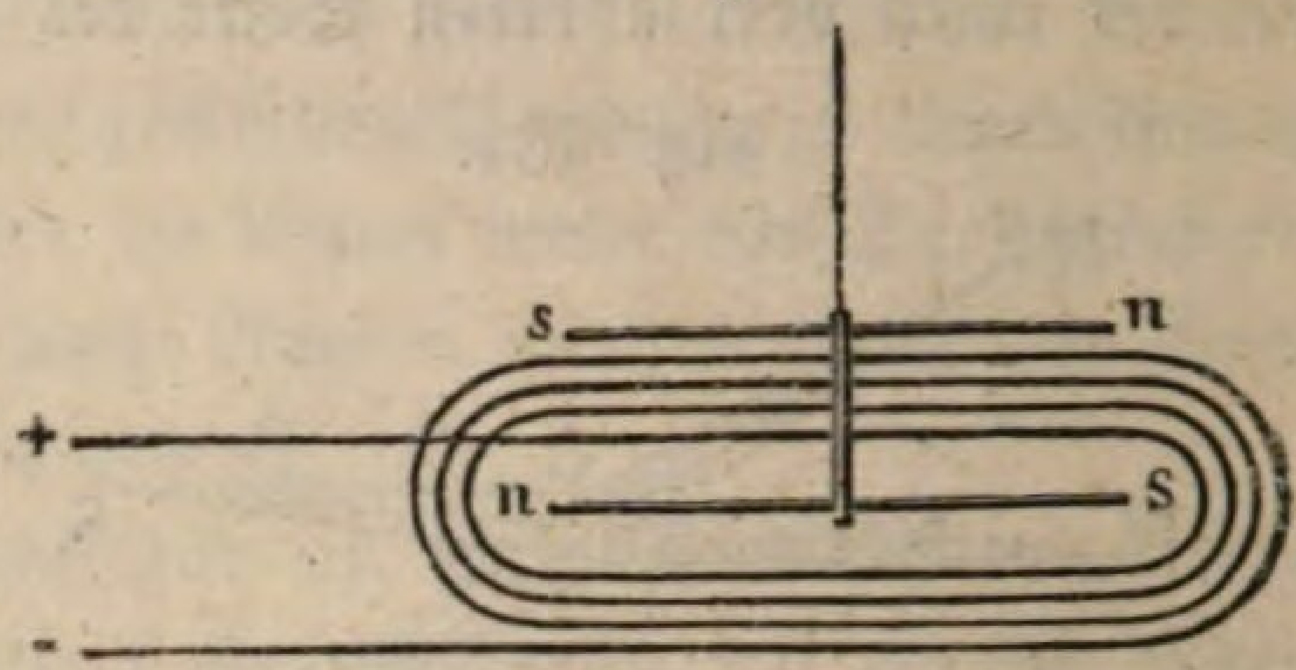


Fig. 436.



sind hier zwei Magnetnadeln so mit einander verbunden, daß sie einander parallel sind, daß aber der Nordpol der einen nach derselben Seite gerichtet ist, nach welcher der Südpol der anderen schaut. Bei einem solchen System von zwei Nadeln ist die richtende Kraft des Erdmagnetismus außerordentlich gering, denn sie ist nur die Differenz der Kräfte, mit welchen der Erdmagnetismus jede einzelne Nadel zu richten strebt. Wäre das magnetische Moment beider Nadeln vollkommen gleich, so würde die richtende Kraft, welche die Erde auf dies System ausübt, gleich Null seyn.

Während nun ein solches astatisches Nadelpaar nur mit sehr geringer Kraft durch den Erdmagnetismus gerichtet wird, summirt sich die Wirkung des Stromes auf beide Nadeln; denn indem die eine Nadel innerhalb der Windungen, die andere über denselben hängt, werden beide Nadeln nach gleicher Richtung durch den Strom abgelenkt.

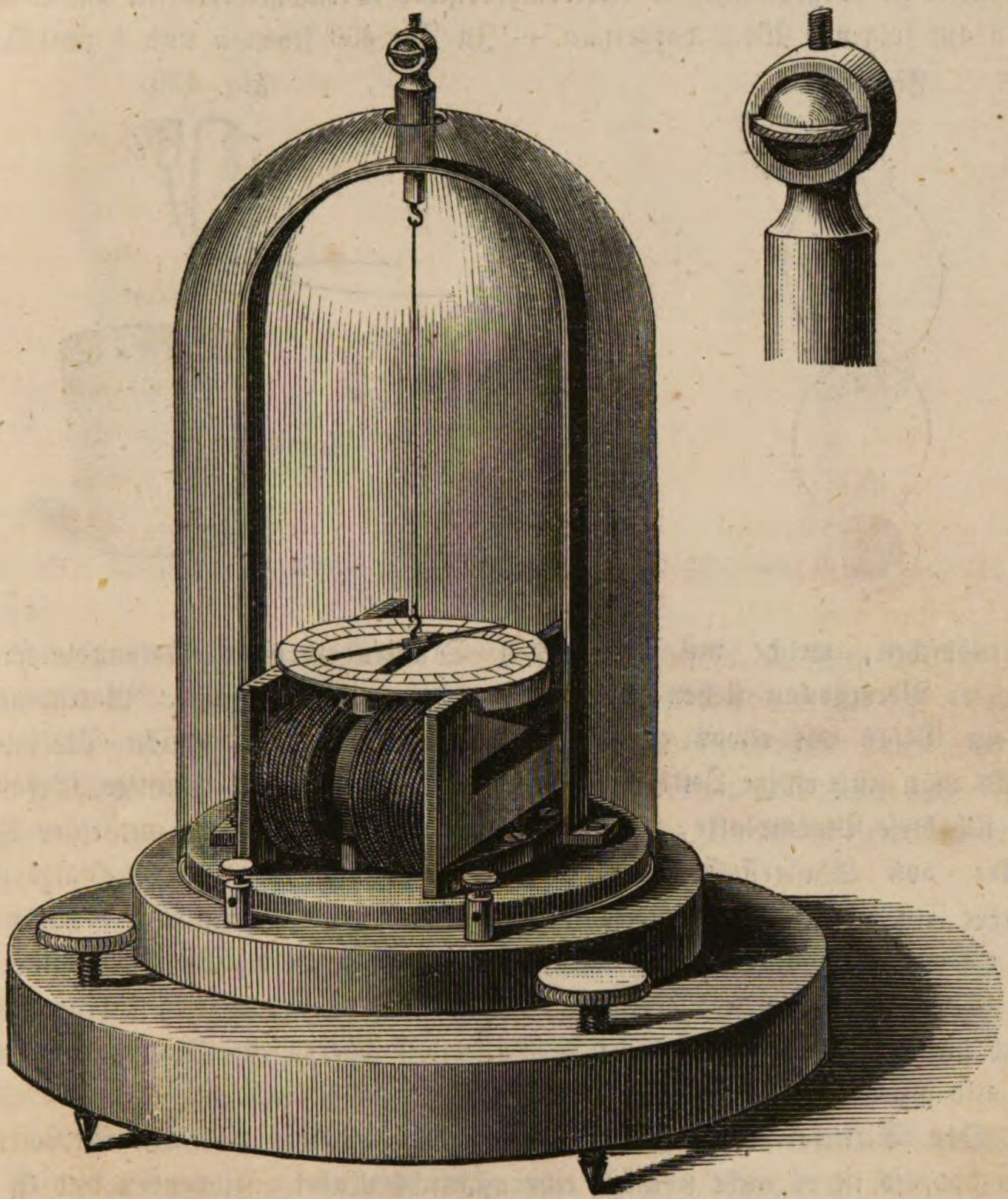
Fig. 437 stellt die Gesammteinrichtung eines Multiplicators dar. Der übersponnene Draht ist auf einen Holzrahmen aufgewickelt; die Drahtenden sind mit zwei auf der Vorderseite der Figur sichtbaren Messingsäulchen verbunden, in welche man die Zuleitungsdrähte einschrauben kann. Unter der oberen Nadel befindet sich ein Theilkreis. Das Nadelpaar hängt an einem einfachen Seidenfaden und kann nach Belieben etwas gehoben oder gesenkt werden. Die Glasglocke, welche das Ganze bedeckt, dient zur Abhaltung der Luftströmungen.

Je nach den Umständen wendet man Multiplicatoren an, die aus wenig Windungen eines dickeren oder aus sehr vielen Windungen eines dünneren Drahtes bestehen.

Das Galvanometer liefert uns ein Mittel, die Theorie der constanten Ketten, wie sie oben auseinander gesetzt wurde, durch directe Versuche zu bestätigen. — Nach Paragraph 196 beruht die rasche Abnahme der Stromstärke der gewöhnlichen **Volta**'schen Ketten darauf, daß sich die negative Platte mit einer Schicht von Wasserstoffgas überzieht, welches der ursprünglichen elektromotorischen Kraft der Kette entgegenwirkt. Aehnliches findet Statt an den Platten eines Voltameters; die negative Polplatte überzieht sich mit Was-

serstoff, die positive überzieht sich mit Sauerstoff; dadurch aber wird die Zerlegungszelle selbst elektromotorisch, und zwar dem ursprünglichen Strom ent-

Fig. 437.



gegengesetzt. Daher kommt es, daß man mit einem einzigen constanten Element nur eine höchst unbedeutende Wasserzersetzung erzeugen kann. — Diese in den Voltametern auftretende elektromotorische Gegenkraft wird mit dem Namen der galvanischen Polarisation bezeichnet; ihre Existenz wird durch folgenden Versuch bestätigt. Man bringe in den Schließungsbogen, Fig. 438 (s. f. S.), eines einzelnen constanten Bechers *b* einen Wasserzersetzungsapparat (Voltameter) *a*; nachdem die Schließung eine Zeitlang gedauert hat, hebe man sie auf und verbinde die beiden Platten des Voltameters *a* mit den beiden Drahtenden des Galvanometers *c*, so wird dieses einen Strom zeigen, welcher der Richtung nach demjenigen entgegengesetzt ist, den die Kette *b* vorher durch das Voltameter *a* gesandt hatte.

Dieser Polarisationsstrom ist vorübergehend, er verschwindet bald mit dem Gasüberzug der Voltameterplatte.

Daß es aber wirklich der Gasüberzug ist, welcher den beiden Voltameterplatten ein entgegengesetztes elektromotorisches Vermögen ertheilt, hat Schönbein auf folgende Weise dargethan. — In Fig. 439 seyen *a* und *b* zwei Quecksilbernäpfchen,

Fig. 438.

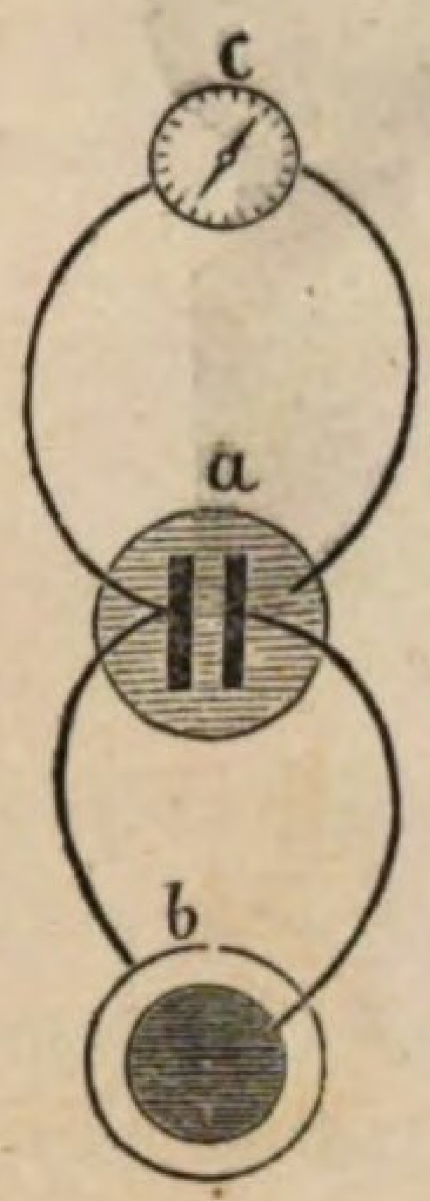
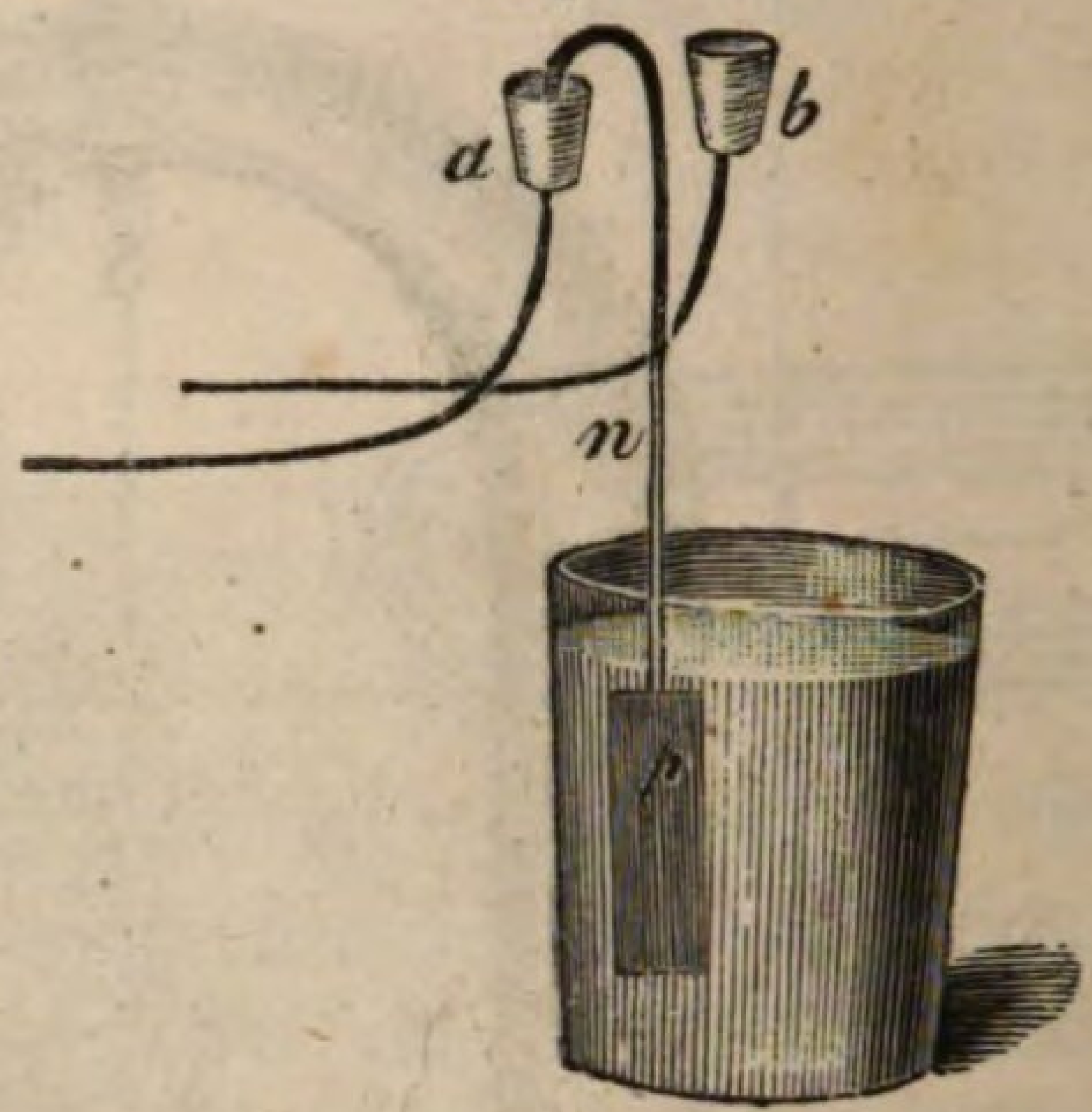


Fig. 439.



welche mit den beiden Drahtenden eines Galvanometers in leitender Verbindung stehen; von *a* hängt eine wohl gereinigte Platinplatte *p* in ein Gefäß mit etwas gesäuertem Wasser; eine ganz gleiche Platinplatte tauche man nun einige Zeitlang in ein mit Wasserstoffgas gefülltes Gefäß, so daß sich diese Platinplatte, die wir mit *p'* bezeichnen wollen, mit einer Atmosphäre von Wasserstoffgas überzieht; bringt man nun diese Platte *p'* in dieselbe Flüssigkeit, in welche *p* eintaucht, sowird das Galvanometer augenblicklich einen Strom anzeigen, so bald man den an *p'* befindlichen Drahthaken in das Quecksilbernäpfchen *b* eintaucht, und zwar geht der positive Strom von *p'* durch die Flüssigkeit zu *p*; die mit Wasserstoff überzogene Platinplatte verhält sich also gegen die reine wie Zink zu Kupfer.

200 **Die Tangentenbussole.** Wenn man es mit stärkeren Strömen zu thun hat, so ist es nicht nöthig, eine astatische Nadel anzuwenden und so viele Drahtwindungen so nahe um die Nadel herumzuführen; dadurch aber ist es möglich, Instrumente zu construiren, bei welchen der Ablenkungswinkel in einem einfachen Verhältnisse zu der Stromstärke steht. Der einfachste und zweckmäßigste Apparat zur Messung stärkerer Ströme ist die sogenannte Tangentenbussole, welche Fig. 440 abgebildet ist. Der Strom wird durch einen kreisförmigen Kupferstreifen um die Nadel herumgeleitet, welche sich in der Mitte dieses Kreises befindet und sehr klein gegen seinen Durchmesser ist. Die Einrichtung des Instrumentes ist aus Fig. 441 deutlicher zu ersehen.

Der Apparat wird so fest gestellt, das der Kupferring in der Ebene des magnetischen Meridians liegt; natürlich befindet sich in diesem Falle die Nadel in der Vertikalebene des Ringes und zeigt auf den Nullpunkt ihrer Theilung; sobald aber ein galvanischer Strom durch den Kupferring geht, wird die Nadel

abgelenkt, und zwar ist die Stärke des Stromes der trigonometrischen Tangente des Ablenkungswinkels proportional, daher auch der Name des Instrumentes.

Fig. 440.

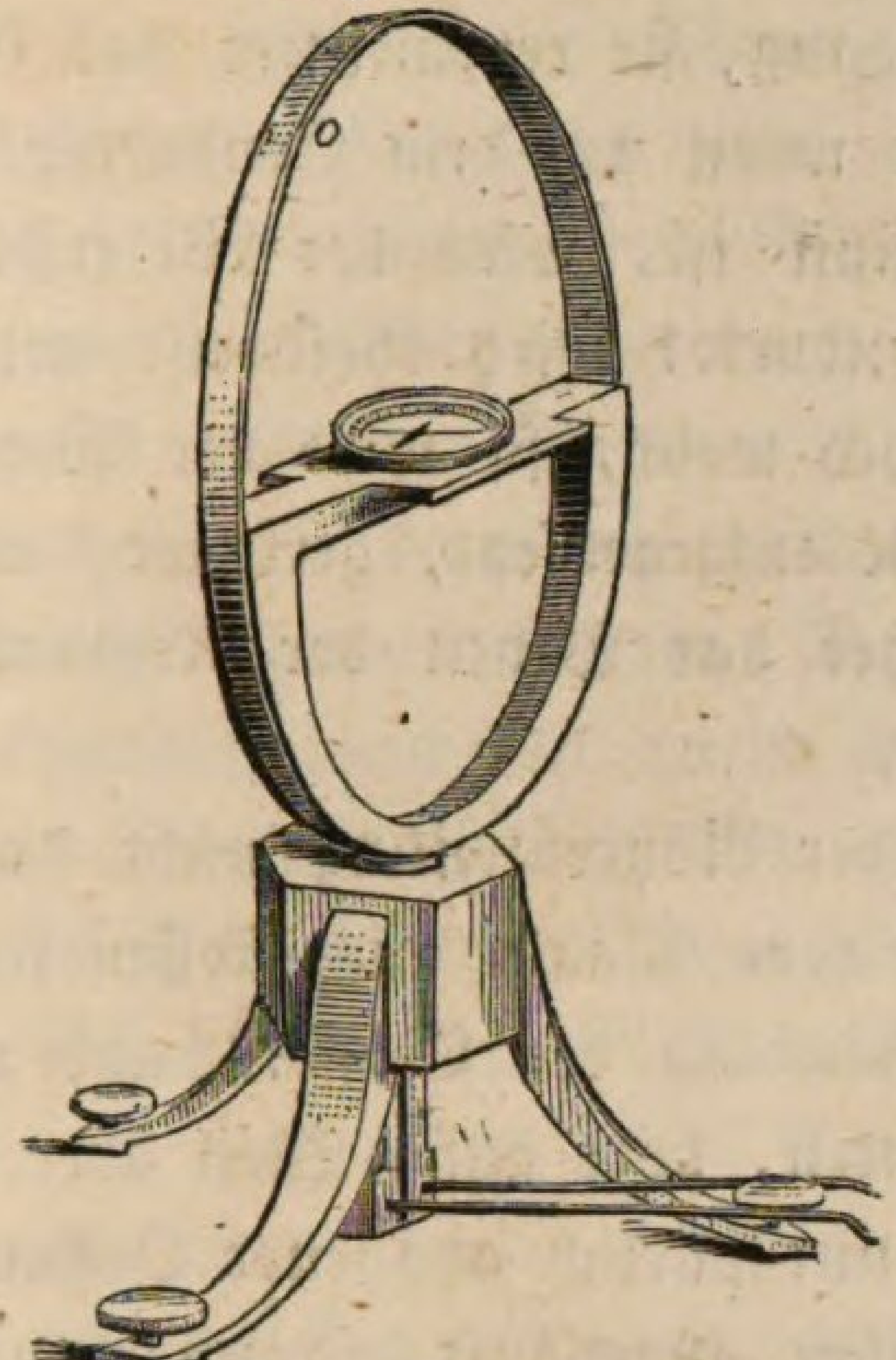
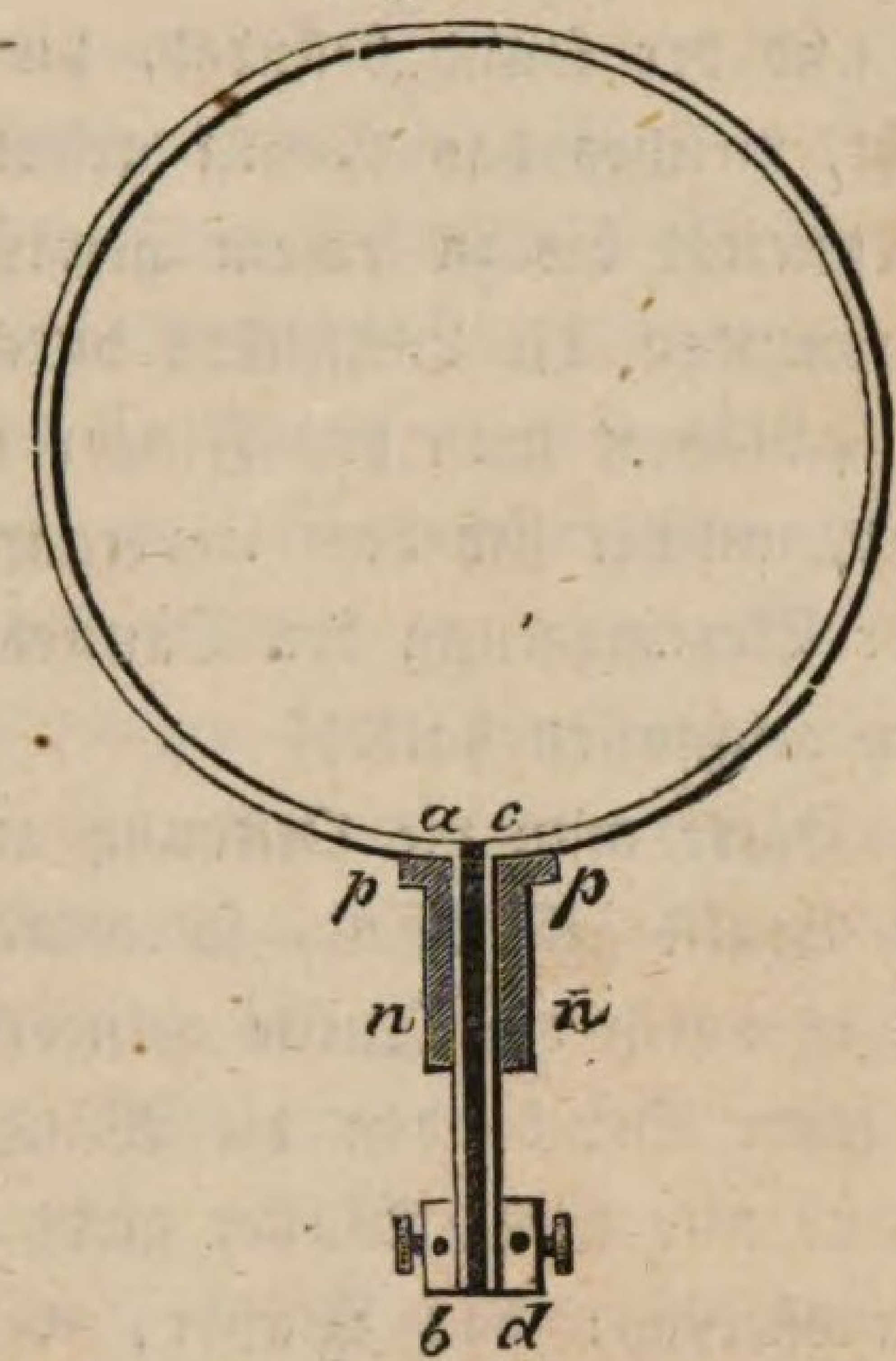


Fig. 441.



Kraft der galvanischen Kette. Das Agens, welches in den Phä- 201
nomenen des Galvanismus wirkt, ist durchaus nichts Anderes als die Elektricität, welche uns auch die Elektrisirmaschine und das Elektrophor liefert; nur ist hier die Elektricität in Bewegung, dort in Ruhe; hier beobachten wir Bewegungserscheinungen, dort die Phänomene des Drucks; hier haben wir eine reiche, dort eine verhältnißmäßig arme Quelle von Elektricität.

Ein Bild kann vielleicht das wahre Sachverhältniß recht klar machen. Wir können die Elektrisirmaschine einer Quelle vergleichen, welche nur spärlich Wasser giebt, aber hoch auf einem Berge liegt. Man kann das Wasser in einer engen Röhrenleitung sammeln, welche bis in das Thal hinabgeht und unten verschlossen ist. Die Wände dieser Röhrenleitung haben natürlich einen starken Druck auszuhalten, namentlich am unteren Ende, obgleich die Wassermasse in der Röhrenleitung so groß nicht ist. Am unteren Ende der Röhrenleitung befinde sich nun eine Oeffnung, die durch ein Ventil verschlossen ist, welches durch eine Feder oder durch ein Gewicht auf die Oeffnung gepreßt ist, wodurch sie verschlossen gehalten wird. Je mehr aber die Wassersäule in der Röhre steigt, desto stärker wird der Druck; endlich reicht der äußere Gegendruck nicht mehr hin, Widerstand zu leisten, das Ventil wird geöffnet, und mit Gewalt strömt das Wasser hervor; dabei aber sinkt rasch das Niveau in der Röhre; der äußere Druck gewinnt wieder das Uebergewicht und schließt die Oeffnung. Allmälig füllt sich die Röhre wieder, und nach einiger Zeit ist das Wasser wieder so hoch gestiegen, daß es von Neuem das Ventil öffnet.

Bei der Elektrisirmaschine ist der Conductor das Gefäß, die Röhrenleitung, in welcher die Elektricität angehäuft wird. Nähert man dem einen Ende des Conductors einen Leiter, etwa den Knöchel eines Fingers, so wird hier die

größte Anhäufung von Elektricität stattfinden; sie hat ein Bestreben, auf den Finger überzuspringen, allein die Luftschicht, welche sich zwischen dem Conductor und der Hand befindet, hindert diesen Uebergang, sie repräsentirt das Gewicht, welches das Ventil geschlossen hält. Erst wenn auf dem Conductor die Elektricität bis zu einem gewissen Grade angehäuft ist, wird der Widerstand überwunden, die Luftschicht durchbrochen, der Conductor wird theilweise entladen. Nähert man den Finger dem Conductor noch mehr, so wird der Widerstand, welcher sich dem Uebergange der Elektricität entgegensetzt, geringer, was einer Verringerung des Druckes entspricht, welcher das Ventil der Röhrenleitung geschlossen hält.

Hätte man die Oeffnung am unteren Ende der Röhrenleitung nicht durch das Ventil geschlossen, so würde das Wasser in dem Maaße ausgeflossen seyn, als es durch die Quelle geliefert wird, eine Anhäufung des Wassers und mit ihr jener Druck, den die Wände auszuhalten hatten, hört auf. Weil aber die Quelle nur wenig Wasser giebt, so wird es auch nur spärlich aus jener Oeffnung herausfließen: das Wasser, welches, in der Röhre angehäuft, so ungeheuren Druck ausüben könnte, wird nun, da es frei abfließen kann, kaum einen merklichen mechanischen Effect hervorbringen können.

Diesem freien Abfließen des Wassers einer armen Quelle entspricht der Fall, daß man den Conductor der Maschine mit dem Boden oder dem Reibzeuge in leitende Verbindung setzt. Alle Spannung, alle Anhäufung der Elektricität auf den Conductor hört auf; der dünnste Draht ist schon im Stande, alle Elektricität vom Conductor vollständig abzuleiten, und diese frei abströmende Elektricität kann kaum Spuren der mächtigen Wirkungen hervorbringen, welche wir an galvanischen Apparaten beobachten.

Die galvanischen Apparate gleichen einer sehr reichen Quelle, die aber nur ein geringes Gefälle hat und deren Wasser in weiten Kanälen frei abfließt. Die große Masse des strömenden Wassers übt nur einen geringen Druck auf die Wände aus, aber sie ist im Stande, mechanische Effecte hervorzubringen, Räder zu treiben u. s. w.

Wenn man eine große Leidner Flasche durch einen dünnen Draht entladet, so wird dieser, wie wir gesehen haben, glühend, weil eine ziemlich große Elektricitätsmenge auf einmal durch ihn hindurchgeht. Die Wirkung ist aber nur momentan; in einem Augenblicke geht alle Elektricität, welche man durch längeres Drehen der Maschine in der Flasche angehäuft hatte, durch den dünnen Draht hindurch. Ganz anders verhält es sich, wenn man die beiden Pole eines großplattigen galvanischen Apparates durch einen dünnen kurzen Draht verbindet. Der Draht wird glühend, selbst wenn er bei weitem dicker ist als der Draht, den man durch den Entladungsschlag der Leidner Flasche ins Glühen bringt; das Glühen ist aber hier nicht momentan, es dauert fort, so lange der Strom durch den Draht hindurchgeht; in jedem Augenblicke liefert also der galvanische Apparat ungleich mehr Elektricität, als man durch längeres Drehen der Maschine in der Flasche anhäufen konnte.

Untersuchen wir nun, von welchen Umständen die Quantität der Elektricität abhängt, welche ein galvanischer Apparat zu liefern im Stande ist.

Die galvanischen Ketten sind aus Metallen und Flüssigkeiten construirt. Flüssigkeiten sind aber keine guten Leiter der Elektricität, sie stehen in dieser Hinsicht bei weitem den Metallen nach. Die feuchten Schichten, welche sich zwischen den Metallplatten der Volta'schen Säule befinden, sind nicht im Stande, alle die Elektricität in einer gegebenen Zeit durchzulassen, welche in derselben Zeit durch die elektromotorische Kraft in der Säule möglicher Weise entwickelt werden könnte. Begreiflicher Weise hängt also die Quantität der Elektricität, welche in einem solchen Apparate circuliren kann, von dem Querschnitt der feuchten Schichten ab; der Querschnitt der feuchten Leiter hängt aber in der Volta'schen Säule von der Größe der Plattenpaare ab, man kann also die Quantität der Elektricität durch Vergrößerung der Platten vermehren. Für die Richtigkeit dieses Schlusses werden wir später experimentelle Beweise kennen lernen.

Untersuchen wir nun, welchen Einfluß die Zahl der Plattenpaare auf den galvanischen Strom hat. Denken wir uns eine Zinkplatte, auf diese eine feuchte Scheibe und auf diese wieder eine Kupferplatte gelegt, die beiden Metallplatten durch einen Kupferdraht verbunden, so haben wir eine geschlossene einfache galvanische Kette. Der Widerstand, welchen der Strom im feuchten Leiter zu überwinden hat, ist ungleich größer als der Widerstand, welchen der Draht der Circulation des Stromes entgegensetzt; der Apparat kann weit mehr *E* liefern, als der feuchte Leiter durchläßt. Die Zahl der Elemente werde nun verdoppelt und die oberste Kupferplatte wie vorher durch einen Kupferdraht mit der untersten Zinkplatte verbunden, so haben wir nun eine Kette von zwei Elementen. Es ist nun die Frage, ob in dieser Vorrichtung eine größere Quantität von Elektricität circuliren kann, als in der oben betrachteten einfachen Kette?

In der einfachen Kette war die Quantität der circulirenden *E* durch den Widerstand des feuchten Leiters begränzt; dieser Widerstand ist durch die zweite feuchte Scheibe verdoppelt; dagegen ist aber auch die Spannung, welche den elektrischen Strom durchtreibt, noch einmal so groß geworden, es wird also in beiden Fällen gleichviel Elektricität circuliren. Die Vermehrung der Plattenpaare trägt bei vollkommener Schließung der Kette nichts zur Vermehrung der Quantität der circulirenden Elektricität bei; bei vollkommener Schließung ist es also ganz gleichgültig, ob man ein oder viele Plattenpaare anwendet. Bei unvollkommener Schließung aber, d. h. wenn ein schlechter Leiter in den Schließungsbogen eingeschaltet wird, muß man vielplattige Ketten anwenden, weil eine größere elektrische Tension nöthig ist, um den Durchgang durch den schlechten Leiter gleichsam zu erzwingen. Die Intensität des galvanischen Stromes ist der Anzahl der Plattenpaare proportional.

Das Ohm'sche Gesetz. Die eben angedeuteten Beziehungen der Stromstärke zu den Elementen der Kette sind durch Ohm auf streng mathematische 202

Formen zurückgeführt worden. Durch das nach seinem Urheber genannte Ohm'sche Gesetz, dessen Grundzüge sogleich näher entwickelt werden sollen, ist erst den Untersuchungen über die Stromstärke eine sichere Basis gegeben worden.

Damit ein elektrischer Strom durch einen Leiter hindurchgehen könne, ist es durchaus nöthig, daß die Elektricität an verschiedenen Stellen des Leiters eine ungleiche Spannung habe. Berührt man z. B. den Conductor einer Elektrisirmaschine mit einem Drahte, so strömt die Elektricität nur deshalb durch denselben ab, weil die starke Spannung der Elektricität auf dem Conductor dieselbe durch den Draht hindurchtreibt, weil also an dem einen Ende des Drahtes, da nämlich, wo er den Conductor berührt, eine stärkere Anhäufung von Elektricität stattfindet als am anderen; verbände man zwei gleiche, gleich stark mit derselben Elektricität geladene Conductoren durch einen Draht, so könnte kein Strom entstehen.

Wenn die Volta'sche Säule isolirt ist, so befinden sich die entgegengesetzten Elektricitäten an den Polen in dem Zustande der Spannung, und dieser Zustand kann unmöglich ganz verschwinden, wenn die beiden Pole durch einen Leiter verbunden werden, denn es kann keine positive Elektricität von dem positiven Pole abströmen, wenn hier nicht eine größere Anhäufung dieser Elektricität stattfände; es ist eine gewisse Spannung der Elektricität, gleichsam ein gewisser Druck nöthig, damit eine Bewegung entstehe, damit die Leitungswiderstände in dem Leiter überwunden werden, durch welchen der Strom hindurchgehen soll.

Die Quantität der Elektricität, welche einen Leiter durchströmt, hängt also wesentlich von zwei Umständen ab, erstens von dem zu überwindenden Leitungswiderstande und zweitens von der Spannung, dem Drucke, welcher die Elektricität durch den Leiter hindurchtreibt, oder mit anderen Worten, der elektromotorischen Kraft, welche den Strom erzeugt; es ist nun leicht einzusehen, daß die Quantität der Elektricität, welche durch einen gegebenen Leiter in einer gegebenen Zeit hindurchgeht, im umgekehrten Verhältnisse des Leitungswiderstandes und im geraden Verhältnisse der elektromotorischen Kraft stehen muß.

Die Quantität der Elektricität, welche einen Leiter durchströmt, die Stromstärke, läßt sich also ausdrücken durch $\frac{E}{L}$, wenn E die elektromotorische Kraft, welche den Strom erzeugt, und L den zu überwindenden Leitungswiderstand bezeichnet.

Betrachten wir den Strom eines einfachen geschlossenen Volta'schen Elementes. Die elektromotorische Kraft, welche den Strom veranlaßt, sey e, der Leitungswiderstand im Becher selbst sei λ, im Schließungsdrahte aber l, so ist also die Stromstärke

$$p = \frac{e}{\lambda + l}.$$

Hätte man n solcher Elemente zu einer Säule vereinigt, so würde die elektromotorische Kraft, welche den Strom in Bewegung setzt, ne seyn, der Widerstand in der Kette aber ist in demselben Verhältnisse gewachsen, denn jetzt ist nicht der Widerstand in einem, sondern in n Elementen zu überwinden, der Leitungswiderstand ist also jetzt $n\lambda$. Wenn nun der Schließungsbogen derselbe ist wie vorher, so hat man für die Stromstärke

$$p' = \frac{n e}{n\lambda + l}.$$

Wäre l sehr klein im Vergleiche zu λ, so würde der obige Werth von p sehr nahe $\frac{e}{\lambda}$, der Werth von p' aber $\frac{n e}{n \lambda}$, also auch $= \frac{e}{\lambda}$ seyn; wenn also der Widerstand im Schließungsbogen klein ist im Vergleiche zu dem Leitungswiderstande eines einzelnen Elementes, so gewährt die Vermehrung der Elemente gar keinen Vortheil. Dahingegen hat eine Vermehrung der Elemente eine Vermehrung der Stromstärke zur Folge, wenn l sehr groß ist, d. h. wenn im Schließungsbogen ein bedeutender Widerstand zu überwinden ist.

Betrachten wir nun den Einfluß, welchen die Vergrößerung der Oberfläche einer einfachen Kette hat. Die Stromstärke für ein einziges Element wurde oben mit $p = \frac{e}{\lambda + l}$ bezeichnet; wenn nun die Oberfläche des Volta'schen Elementes $n$mal so groß würde, ohne daß sonst etwas geändert wird, so hätte dies doch nur zur Folge, den Leitungswiderstand in der Kette selbst $n$mal kleiner zu machen, weil ja der Querschnitt der Flüssigkeit, durch welche der Strom hindurchgehen muß, $n$mal größer geworden ist; statt des Widerstandes λ hätte man also jetzt $\frac{\lambda}{n}$, die Stromstärke p'' wird also seyn

$$p'' = \frac{e}{\frac{\lambda}{n} + l}$$

oder was dasselbe ist

$$p'' = \frac{n e}{\lambda + n l}.$$

Wäre l, d. h. der Leitungswiderstand im Schließungsbogen, gleich Null, so wäre die Stromstärke der Oberfläche des elektrometrischen Elementes proportional; dies ist auch noch sehr nahe der Fall, wenn l nur sehr klein ist; eine Vergrößerung der Oberfläche bringt also dann eine Vermehrung der Stromstärke hervor, wenn der Leitungswiderstand im Schließungsbogen klein ist gegen den Widerstand in der Kette.

Die Werthe für die Leitungswiderstände in der Kette selbst und im Schließungsbogen müssen natürlich auf eine und dieselbe Einheit bezogen werden, wie wir dies sogleich sehen werden.

Diese Gesetze werden durch den Versuch vollkommen bestätigt.

Um zu zeigen, daß sich die Stromstärke umgekehrt verhält wie die Länge

des Schließungsbogens, hat man nur ein galvanisches Element (etwa ein Becquerel'sches Element) durch die Tangentenbussole zu schließen und dann der Reihe nach Drahtstücke von verschiedener Länge einzuschalten und jedesmal die entsprechende Ablenkung abzulesen.

Eine Versuchsreihe der Art gab folgende Resultate:

Länge des eingeschalteten Kupferdrahtes.	Beobachtete Ablenkung.	Tangente des Ablenkungswinkels.
0 Meter	62° 00′	1,880
5	40 20	0,849
10	28 30	0,543
40	9 45	0,172
70	6 00	0,105
100	4 15	0,074

Man sieht hier gar keine Regelmäßigkeit in der Abnahme, welche die Stromstärke erleidet, wenn der eingeschaltete Draht länger wird; wenn man aber bedenkt, daß dieser Draht nicht das einzige Hinderniß für den Strom ist, daß in dem elektromotorischen Apparate selbst und in den verschiedenen Theilen der Bussole, welche der Strom durchläuft, ein Leitungswiderstand überwunden werden muß, was wir als **Widerstand des Elementes** bezeichnen wollen, so ist klar, daß man den Widerstand des Elementes gleichsetzen kann dem Widerstande eines Kupferdrahtes von derselben Dicke wie der eingeschaltete und von der noch unbekannten Länge x. Eigentlich also sind folgende die zusammengehörigen Längen der Kette und Ablenkungswinkel:

Länge der Kette.	Beobachtete Ablenkung.	Tangente des Ablenkungswinkels.
x	62° 00′	1,880
x + 5	40 20	0,849
x + 10	28 30	0,543
x + 40	9 45	0,172
x + 70	6 00	0,105
x + 100	4 15	0,074

Wenn sich nun die Stärke der hydroelektrischen Ströme wirklich umgekehrt

verhält wie die Länge der Kette, so müssen sich die Zahlen der ersten Columne umgekehrt verhalten wie die Zahlen der letzten; es muß also seyn

$$x : x + 5 = 0{,}849 : 1{,}880,$$

woraus sich ergiebt $x = 4{,}11$. Vergleicht man auf dieselbe Weise die erste Beobachtung mit allen folgenden, so muß man immer gleichen Werth für x erhalten; und in der That sind die auf diese Weise berechneten Werthe von x sehr nahe einander gleich; man findet nämlich außer dem schon berechneten 4,06, 4,03, 4,14 und 4,09 Meter. Das Mittel daraus ist 4,08.

Der Widerstand des Elementes ist also gleich dem Widerstande eines 4,08 Meter langen Kupferdrahtes von derselben Dicke wie der eingeschaltete. Legt man diese Länge zu Grunde, so kann man nach dem allgemeinen Gesetze, daß sich die Stärke des Stromes umgekehrt verhält wie die Länge der Kette, leicht die Ablenkungen berechnen, welche man hätte erhalten müssen, und diese mit den direct beobachteten vergleichen, wie dies in der folgenden Tabelle geschehen ist:

Länge der Kette.	Berechnete Ablenkung.	Beobachtete Ablenkung.	Differenz.
4,08 Meter	62° 00′	62° 00′	
9,08	40 18	40 20	+ 2′
14,08	28 41	28 30	— 11
44,08	9 56	9 45	— 11
74,08	5 57	6 00	+ 3
104,08	4 14	4 15	+ 1

Eine solche Uebereinstimmung zwischen den Resultaten der Beobachtung und denen, die man aus dem allgemeinen Gesetze abgeleitet hat, läßt keinen Zweifel mehr über die Richtigkeit dieses Gesetzes.

Um zu zeigen, daß bei vollkommener Schließung, d. h. bei sehr kleinem Leitungswiderstande, im Schließungsbogen die Zahl der Elemente die Stromstärke nicht vermehrt, hat man der Reihe nach eine Kette von 1, 2, 3, 4 u. s. w. Elementen durch die Tangentenbussole zu schließen und die entsprechende Ablenkung zu beobachten. Eine solche Versuchsreihe gab folgende Resultate:

Zahl der Elemente.	Beobachtete Ablenkung.
1	69°
2	66,5
3	67,5
4	67
5	68
6	64.

Man sieht, daß hier in der That die Stromstärke fast ungeändert bleibt, daß sie mit Vermehrung der Elemente nicht wächst. Daß sie nicht ganz unverändert bleibt, rührt nur daher, daß die einzelnen Elemente nicht vollkommen gleich waren.

Wenn jedoch ein bedeutender Leitungswiderstand zu überwinden ist, so wird die Stromstärke mit der Zahl der Elemente allerdings vermehrt.

6 Elemente durch die Tangentenbussole geschlossen, gaben nach Einschaltung eines 40 Meter langen Drahtes eine Ablenkung von 39°.

1 Element, durch denselben 40 Meter langen Draht und die Tangentenbussole geschlossen, gab nur eine Ablenkung von 11°.

203 **Leitungsfähigkeit der Metalle.** Bei den so eben angeführten Versuchen wurden Drahtstücke von verschiedener Länge und gleicher Dicke in den Schließungsbogen der Kette eingeschaltet und dadurch das Verhältniß der Stromstärke zur Länge des Schließungsdrahtes ermittelt. Wenn man nun aber gleich lange, aber ungleich dicke Drähte desselben Metalls in den Schließungsbogen einschaltet und immer die entsprechenden Ablenkungen der Nadel der Tangentenbussole beobachtet, so ergiebt sich aus diesen Versuchen das Verhältniß des Leitungswiderstandes der Drähte zu ihrem Durchmesser; man findet: daß der Leitungswiderstand dem Querschnitte der Drähte umgekehrt proportional ist; oder mit anderen Worten: zwei Drähte desselben Metalls werden gleichen Leitungswiderstand ausüben, wenn sich ihre Längen umgekehrt verhalten wie ihre Querschnitte.

Um die Leitungsfähigkeit verschiedener Metalle mit einander zu vergleichen, ist wohl keine Methode einfacher und sicherer, als den Strom eines hinlänglich kräftigen Elementes durch die Tangentenbussole zu leiten, Drähte verschiedener Metalle von gleicher Länge und Dicke in den Schließungsbogen einzuschalten und die entsprechenden Ablenkungen zu beobachten.

Folgende sind die Werthe des Leitungswiderstandes verschiedener Metalle:

Silber	0,95
Gold	1,38
Kupfer	1,00
Zink	3,69
Platin	11,08
Eisen	7,44
Neusilber	11,30
Quecksilber	50,00.

D. h. wenn wir den Leitungswiderstand eines Kupferdrahtes mit 1 bezeichnen, so ist der eines gleich langen und gleich dicken Drahtes von Eisen, Platin u. s. w. gleich 7,44 — 11,08 u. s. w.

204 **Leitungswiderstand der Flüssigkeiten.** Die Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten ist bedeutend geringer als die der Metalle. Nach den Versuchen von Lenz ist z. B. der Leitungswiderstand einer concentrirten Lösung von Kupfervitriol 6857500mal so groß als der des Kupfers.

Wenn man den Strom einer galvanischen Säule durch eine Flüssigkeit hindurchleitet, so erleidet die Stromstärke eine doppelte Schwächung, einmal weil der bedeutende Leitungswiderstand der Flüssigkeit zu überwinden ist, dann aber noch, weil eine bedeutende Schwächung der elektromotorischen Kraft stattfindet und zwar in Folge einer galvanischen Polarisation, die wir bereits oben betrachtet haben.

Vergleichung verschiedener Volta'scher Apparate. Um den 205
Effect verschiedener Volta'scher Ketten beurtheilen zu können, muß man ihre elektromotorische Kraft und den Leitungswiderstand derselben kennen; diese lassen sich aber nach dem Ohm'schen Gesetz sehr einfach bestimmen; es reichen dazu zwei Messungen der Stromstärke hin, einmal bei vollkommener Schließung, einmal nach Einschaltung eines Drahtes von bekanntem Leitungswiderstande.

Um solche Bestimmungen vergleichbar zu machen, muß man sich über eine bestimmte Einheit des Leitungswiderstandes und der Stromstärke vereinigen. — Als Einheit des Leitungswiderstandes nehmen die meisten Physiker jetzt einen Kupferdraht von 1 Meter Länge und 1 Millimeter Durchmesser; als Einheit der Stromstärke einen Strom, welcher, durch ein Voltameter gehend, in einer Minute 1 Kubikcentimeter Knallgas liefert.

In der Regel mißt man die Stromstärke freilich nicht mit dem Voltameter, sondern mit der Tangentenbussole; es ist aber leicht, die Angaben jeder Tangentenbussole auf Wasserzersetzung zu reduciren; man lasse nur einen Strom, gleichzeitig durch ein Voltameter und die Tangentenbussole gehen, beobachte die Ablenkung letzterer und die Menge des in einer Minute entwickelten Knallgases so ergiebt sich aus einer solchen Beobachtung, mit welcher Zahl man die Tangente des Ablenkungswinkels multipliciren muß, um die entsprechende Knallgasmenge (in Kubikcentimetern ausgedrückt) zu erhalten.

Um den Reductionsfactor genau zu erhalten, wird man sich freilich nicht mit einer einzigen Vergleichung der Art begnügen, sondern man wird mehrere anstellen und aus ihnen das Mittel nehmen.

Gesetzt nun, man habe, diese Einheiten zu Grunde legend, gefunden, daß ein Bunsen'sches Element, nur durch die Tangentenbussole geschlossen, die Stromstärke 50 gebe, so ist

$$\frac{E}{R} = 50 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1),$$

wenn wir mit E die elektromotorische Kraft, mit R den wesentlichen Leitungswiderstand des Elementes bezeichnen.

Nach Einschaltung eines 69 Meter langen Kupferdrahtes von 1 Millimeter Durchmesser sank die Stromstärke auf 10, so ist

$$\frac{E}{R + 69} = 10 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2);$$

aus der Combination der beiden Gleichungen 1) und 2) ergiebt sich

$$R = 17 \qquad E = 850.$$

Als Mittel mehrerer Versuche der Art hat man für die elektromotorische Kraft verschiedener Ketten folgende Werthe gefunden:

Bunsen'sche Kette	840
Grove'sche »	820
Daniell'sche »	470
Wollaston'sche »	210.

Die Differenz der elektromotorischen Kraft der Wollaston'schen und der Daniell'schen Kette hat ihren Grund lediglich darin, daß die elektromotorische Kraft der ersteren durch die galvanische Polarisation geschwächt ist, welche bei der Daniell'schen Kette dadurch, daß das Kupfer in einer Lösung von Kupfervitriol steht, aufgehoben ist.

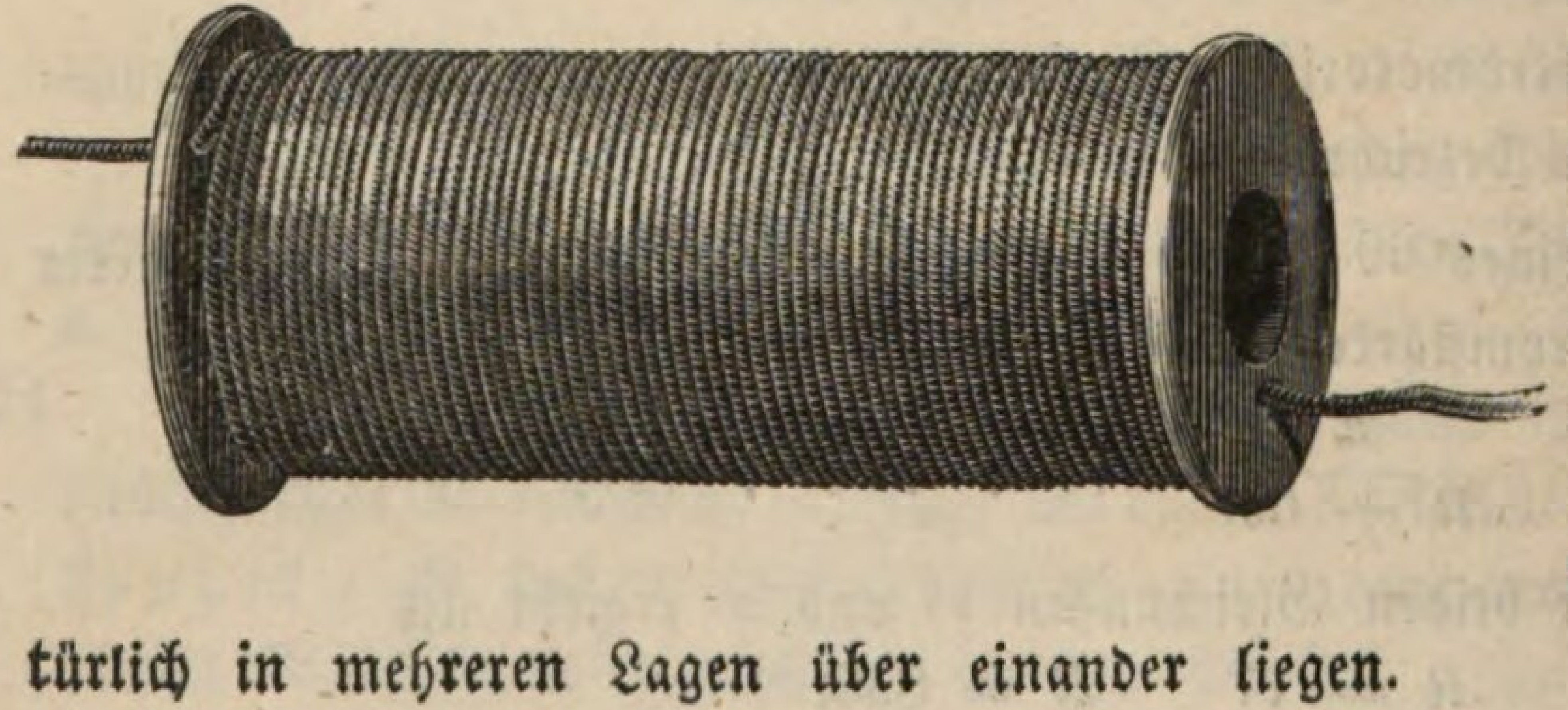
Die Größe der Elemente und der Concentrationsgrad der Flüssigkeiten haben keinen Einfluß auf die Größe der elektromotorischen Kraft, wohl aber auf die Größe des Leitungswiderstandes.

206 **Magnetisirung durch den galvanischen Strom.** Nachdem wir die Ablenkung der Magnetnadel durch den galvanischen Strom und die darauf gegründeten Apparate zur Messung des galvanischen Stromes kennen gelernt hatten, benutzten wir dieselben, um die wichtigsten Gesetze der Stromstärke zu ermitteln. Wir kehren jetzt zur Betrachtung der magnetisirenden Wirkungen des Stromes zurück.

Der elektrische Strom wirkt nicht allein richtend auf den freien Magnetismus, sondern er ist auch im Stande, die noch verbundenen magnetischen Flüssigkeiten zu trennen, d. h. er wirkt auch magnetisirend auf weiches Eisen und Stahl, was sich schon dadurch zeigt, daß ein von einem kräftigen Strom durchflossener Leitungsdraht Eisenfeile anzieht. — Um einen Eisenstab zu magnetisiren, muß man den Strom mehrfach um denselben herumführen, was dadurch geschieht, daß man den mit Seide oder Wolle übersponnenen Leitungsdraht spiralförmig um das Eisen herumwindet. Statt die Drahtwindungen direct auf dem Eisen anzubringen, ist es aber zweckmäßiger, den Draht auf eine Spule von Holz (damit man die Spirale auch zu Inductionsversuchen anwenden kann) aufzuwinden und den zu magnetisirenden Eisenstab in die Höhlung derselben hineinzuschieben.

Fig. 442 stellt eine solche Magnetisirungsspirale dar. Man hat deren von sehr verschiedenen Größen und Drahtdimensionen. Für sehr kräftige Wirkungen werden Magnetisirungsspiralen angewandt, welche aus 800 bis 1000 Windungen eines $\frac{1}{2}$ bis 1 Linie dicken Kupferdrahtes bestehen, die natürlich in mehreren Lagen über einander liegen.

Fig. 442.



Schiebt man nun einen Eisenstab in eine solche Spirale hinein, so wird er magnetisch, sobald ein elektrischer Strom die Spirale durchläuft. Ragen die Enden des Eisenstabes aus der Spirale hervor, so kann man Eisenstücke an dieselben anhängen, welche aber sogleich wieder abfallen, sobald der Strom unterbrochen wird, welcher den Draht durchläuft, weil das weiche Eisen nur so lange

Fig. 443.

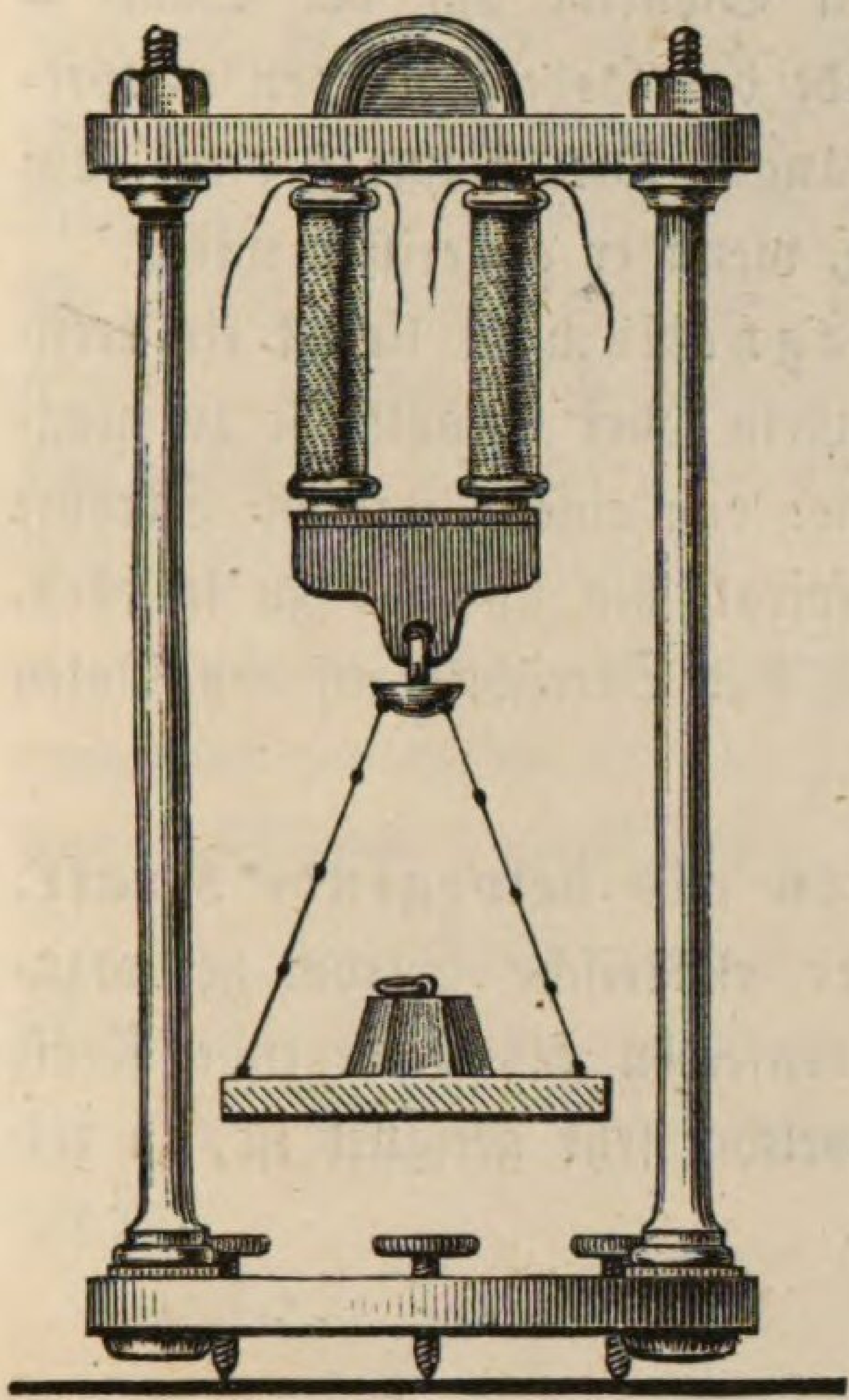
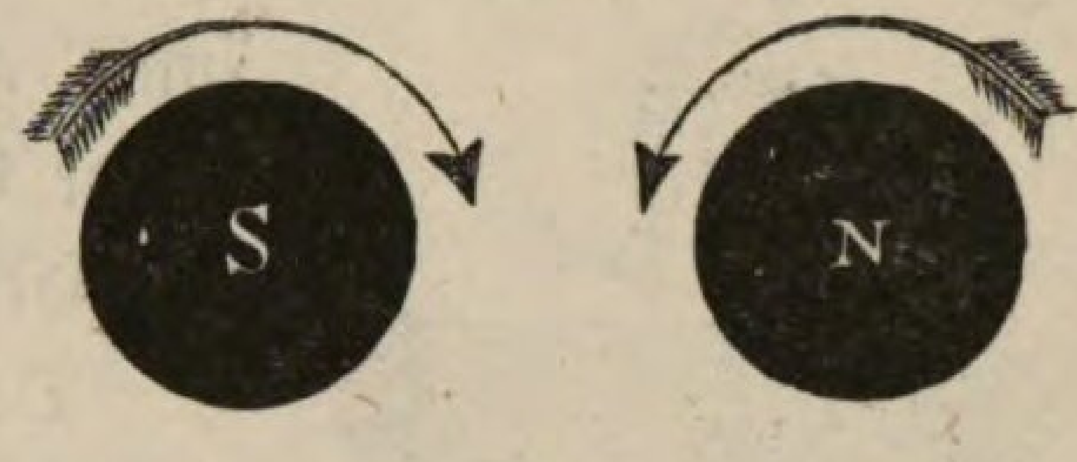


Fig. 444.

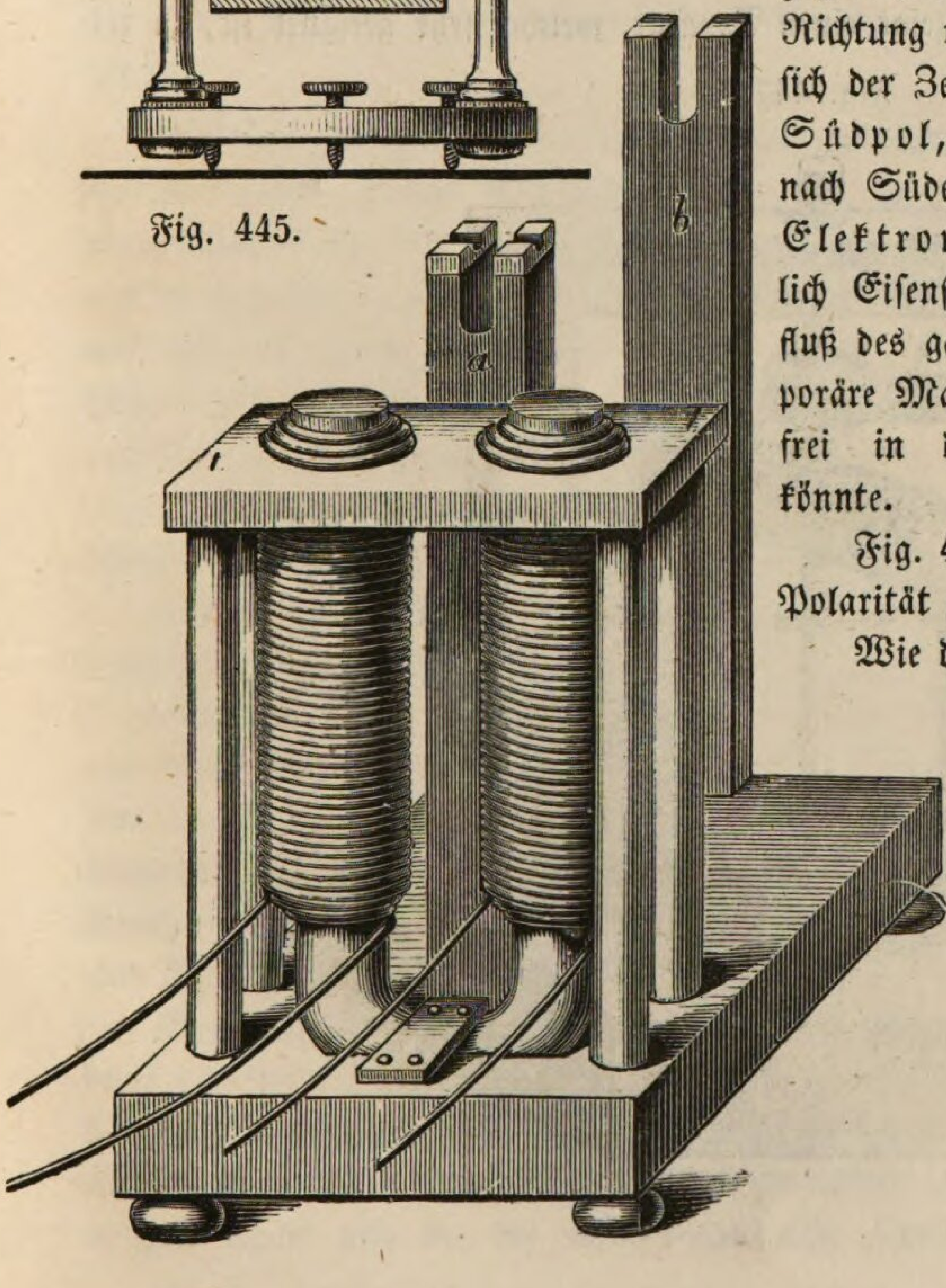


magnetisch bleibt, als es dem magnetisirenden Einfluß ausgesetzt ist.

Was die Polarität der beiden Enden des Eisenstabes betrifft, so ist dieselbe nach den Bemerkungen auf Seite 358 leicht zu bestimmen; dasjenige Ende, welches, dem Beschauer zugewendet, vom positiven Pole in der Richtung umkreist erscheint, in welcher sich der Zeiger einer Uhr dreht, ist der Südpol, derjenige Pol, welcher sich nach Süden richten würde, wenn der Elektromagnet (so nennt man nämlich Eisenstäbe, welche durch den Einfluß des galvanischen Stromes in temporäre Magneten verwandelt sind) sich frei in der Horizantalebene drehen könnte.

Fig. 444 dient, um das Gesetz der Polarität zu erläutern.

Fig. 445.



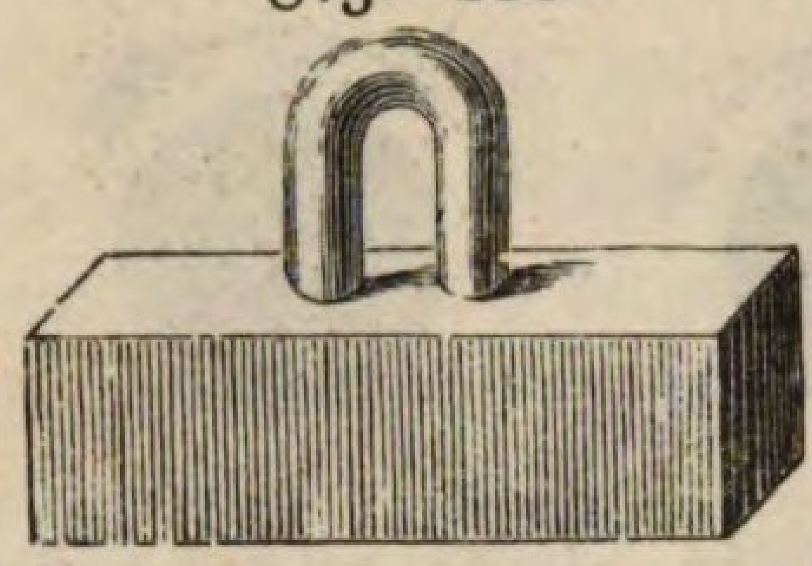
Wie den Stahlmagneten, so giebt man auch den Elektromagneten eine Uförmige Gestalt, wenn man eine große Tragkraft erzielen will. Fig. 443.

Für manche Versuche, namentlich für die diamagnetischen, die wir weiter unten werden kennen lernen, ist es wünschenswerth, daß die bei-

den Pole des Elektromagneten nach oben gerichtet sind. Eine für diese Zwecke geeignete Aufstellung des Elektromagneten ist Fig. 445 (s. v. S.), ungefähr in $\frac{1}{5}$ der natürlichen Größe dargestellt.

Um die Tragkraft solcher Elektromagnete zu prüfen, setzt man auf die Pole einen Anker von der Form Fig. 446; in das Ohr desselben wird ein eiserner

Fig. 446.

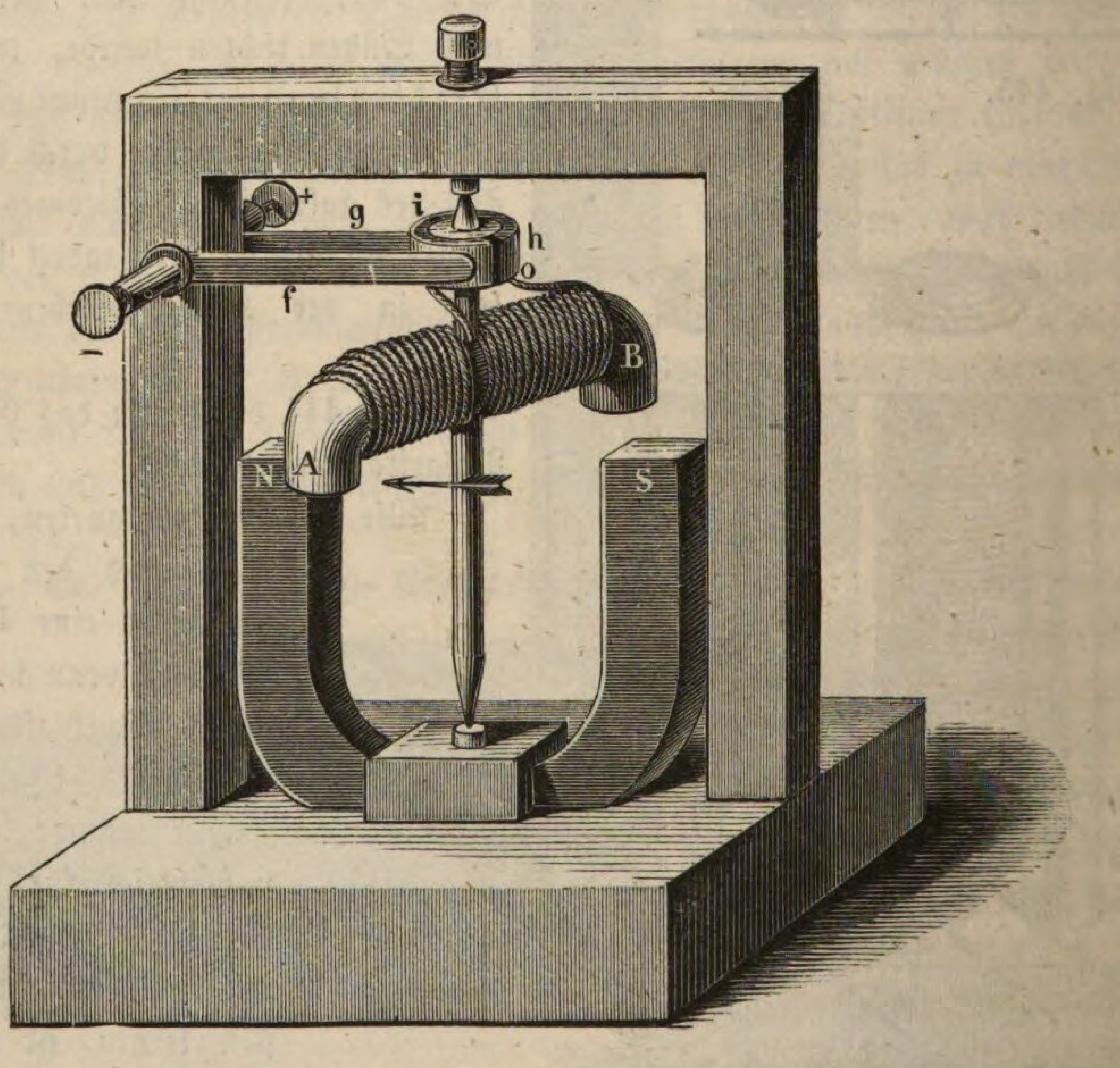


Hebel eingesetzt, dessen Schneide auf der Säule *a* ruht; am anderen Ende des Hebels werden entsprechende Gewichte angehängt. Die Säule *b* dient, um den Hebel aufzuhalten, wenn er abgerissen wird.

Der Elektromagnetismus liefert ein treffliches Mittel, Stahlnadeln oder Stahlstäbe zu magnetisiren; man braucht sie nur einige Male in einer von einem starken Strome durchflossenen kurzen und dicken Magnetisirungsspirale hin und her zu schieben. Zur Magnetisirung sehr harter Stahlstäbe zeigt sich das Streichen auf den Polen eines Elektromagneten noch wirksamer.

207 **Benutzung des galvanischen Stromes als bewegende Kraft.** Die kräftigen magnetischen Wirkungen, welche der elektrische Strom hervorzubringen im Stande ist, führten auf die Idee, denselben als bewegende Kraft zu benutzen. Die Fig. 447 zeigt einen Apparat, welcher sehr geeignet ist, zu zei-

Fig. 447.



gen, wie man durch die magnetisirende Wirkung des galvanischen Stromes eine continuirliche Bewegung hervorbringen kann.

Ein Uförmiger Stahlmagnet ist auf einem Brette so befestigt, daß er vertikal steht und seine Pole nach oben gerichtet sind. In der Mitte zwischen den beiden Schenkeln desselben befindet sich eine vertikale eiserne Axe, welche in Spitzen läuft, und an welcher ein horizontaler Elektromagnet befestigt ist, dessen Pole bei der Rotation um die vertikale Axe gerade über den Polen des Stahlmagneten hinweggehen. — Gerade über dem Elektromagneten ist auf der eisernen Axe eine Scheibe von Holz befestigt, welche von einem Messingringe umgeben ist. Dieser Ring bildet aber kein Ganzes, sondern er besteht aus zwei Hälften *h* und *i*, welche durch zwei einander diametral gegenüberliegende Zwischenräume von einander getrennt sind, also nicht in leitender Verbindung stehen, wie man in der Figur deutlich sieht.

Das eine Ende *o* der Drahtwindungen, welche den Eisenkern des Elektromagneten umkreisen, ist nun an dem Halbringe *h*, das andere Drahtende ist an dem Halbringe *i* angelöthet.

Auf dem Umfange der eben besprochenen Scheibe schleifen zu beiden Seiten zwei Metallfedern *f* und *g*, auf deren äußeren Enden die Klemmschrauben befestigt sind, welche zur Aufnahme der Poldrähte der Batterie dienen.

Nehmen wir an, in die vordere Klemmschraube sey der negative, in die hintere sey der positive Poldraht eingeschraubt, so wird bei der in unserer Figur dargestellten Lage der positive Strom durch die Feder *g* zum Halbring *h* und von diesem durch *o* in die Windungen gelangen, während die vordere Feder auf dem Halbringe *i* schleift, also der positive Strom aus den Windungen über *i* und durch die Feder *f* austritt. Unter diesen Umständen wird das vordere Ende *A* des umströmten Eisens ein Südpol, *A* wird also von *N* und *B* von *S* angezogen, der Elektromagnet dreht sich demnach in der durch den Pfeil angegebenen Richtung.

In dem Moment, in welchem *A* über *N* und *B* über *S* passiren, gehen die isolirenden Zwischenräume zwischen *h* und *i* unter den Federn weg, die Feder *f* kommt auf *h* und *g* kommt auf *i* zu liegen, was einen Stromwechsel und eine Umkehrung der Polarität des Elektromagneten zur Folge hat. *A* wird nun von *N* und *B* wird von *S* abgestoßen, die Rotation dauert also in gleicher Richtung fort. Sobald *A* wieder über *S* und *B* über *N* ankommt, findet abermaliger Polwechsel Statt, durch welchen der Elektromagnet abermals in gleicher Richtung fortgetrieben wird.

Apparate, die nach diesem Principe im Großen ausgeführt wurden, lieferten keine günstigen Resultate. Sehr wesentlich wirkt dazu der Umstand mit, daß das rotirende weiche Eisen nicht so schnell die Pole vollständig umkehrt, als der Strom in dem ihn umgebenden Drahte gewechselt wird; der rotirende Elektromagnet erhält also nie die volle magnetische Kraft, wie sie dem Strome ent-

spräche; dies ist nun um so mehr der Fall, je bedeutender die Masse des rotirenden Elektromagneten ist und je schneller die Rotation vor sich geht.

Stöhrer hat einen Apparat construirt, in welchem dieser Uebelstand vermieden wird; dessenungeachtet sind die Resultate, welchen mit demselben erzielt wurden, nicht von der Art, daß man hoffen dürfte, den Elektromagnetismus als bewegende Kraft praktisch anwendbar zu machen.

208 **Elektrische Telegraphen.** Praktisch sind bis jetzt nur diejenigen Anwendungen des galvanischen Stromes geworden, zu welchen eine geringe Stromstärke hinreicht, und dahin gehört vorzugsweise die elektrische Telegraphie.

Unter den verschiedenen Apparaten, die man zu diesem Zweck gegenwärtig anwendet, ist Morse's Drucktelegraph der einfachste und wohl auch der zweckmäßigste.

Fig. 448 stellt den Morse'schen Schreibapparat in ½ der natürlichen Größe dar. Auf einer eisernen Platte *a* sind zwei Stäbchen von Eisen befestigt, welche, mit den Magnetisirungsspiralen *b* umgeben, einen Hufeisenmagneten bilden. Ueber den Polen schwebt in einiger Entfernung der Eisenstab *c*, welcher in dem Messinghebel *d* steckt. Sobald die Eisenkerne magnetisch werden, wird das rechte Ende des Hebels *d* niedergezogen; wenn die Eisenkerne ihren Magnetismus verlieren, so wird der Hebel durch eine an einem Seitenarme ziehende Feder *f* in seine alte Stellung zurückgezogen.

Der Hebelarm *d* schlägt mit seinem Ende auf der rechten Seite schon auf, bevor noch der Anker *c* vollständig in Berührung mit den Polen des Elektromagneten gekommen ist, weil bei vollkommen anliegendem Anker der Elektromagnet nach Unterbrechung des Stromes seinen Magnetismus nicht ganz verliert, wodurch der Gang des Apparates sehr erschwert und unsicher werden würde.

An seinem linken Ende trägt der Hebel *d* einen Stahlstift, welcher bei jedem Niedergang des Stabes *c* gegen einen Papierstreifen gedrückt wird, den ein Uhrwerk mit gleichmäßiger Geschwindigkeit fortzieht.

Das erste Rad *g* dieses Uhrwerkes wird durch ein an der Welle desselben angehängtes Gewicht langsam umgedreht, und diese Bewegung wird durch mehrere Zwischenräder auf die Walze *h* übertragen, welche sich mit größerer Geschwindigkeit umdreht. Die Umdrehung der Walze *h* bewirkt durch Reibung die Umdrehung der gleich großen Walze *i*. Zwischen beiden steckt ein Papierstreifen, welcher von einer, etwa an der Decke des Zimmers befestigten Rolle kommt. Ist das Uhrwerk im Gang, so wird der Papierstreifen mit gleichförmiger Geschwindigkeit, ungefähr 1 Zoll in der Secunde, fortgezogen.

In der Mitte der Rolle *i* befindet sich eine Rinne, von welcher ein Theil noch in der Figur sichtbar ist. In diese Rinne wird nun der Stift hinein gedrückt, wenn *c* niedergezogen wird; es preßt also der Stift eine Vertiefung in den die Rinne überdeckenden Papierstreifen. Wird der galvanische Strom nur für einen Augenblick geschlossen, so drückt der Stift einen Punkt in das

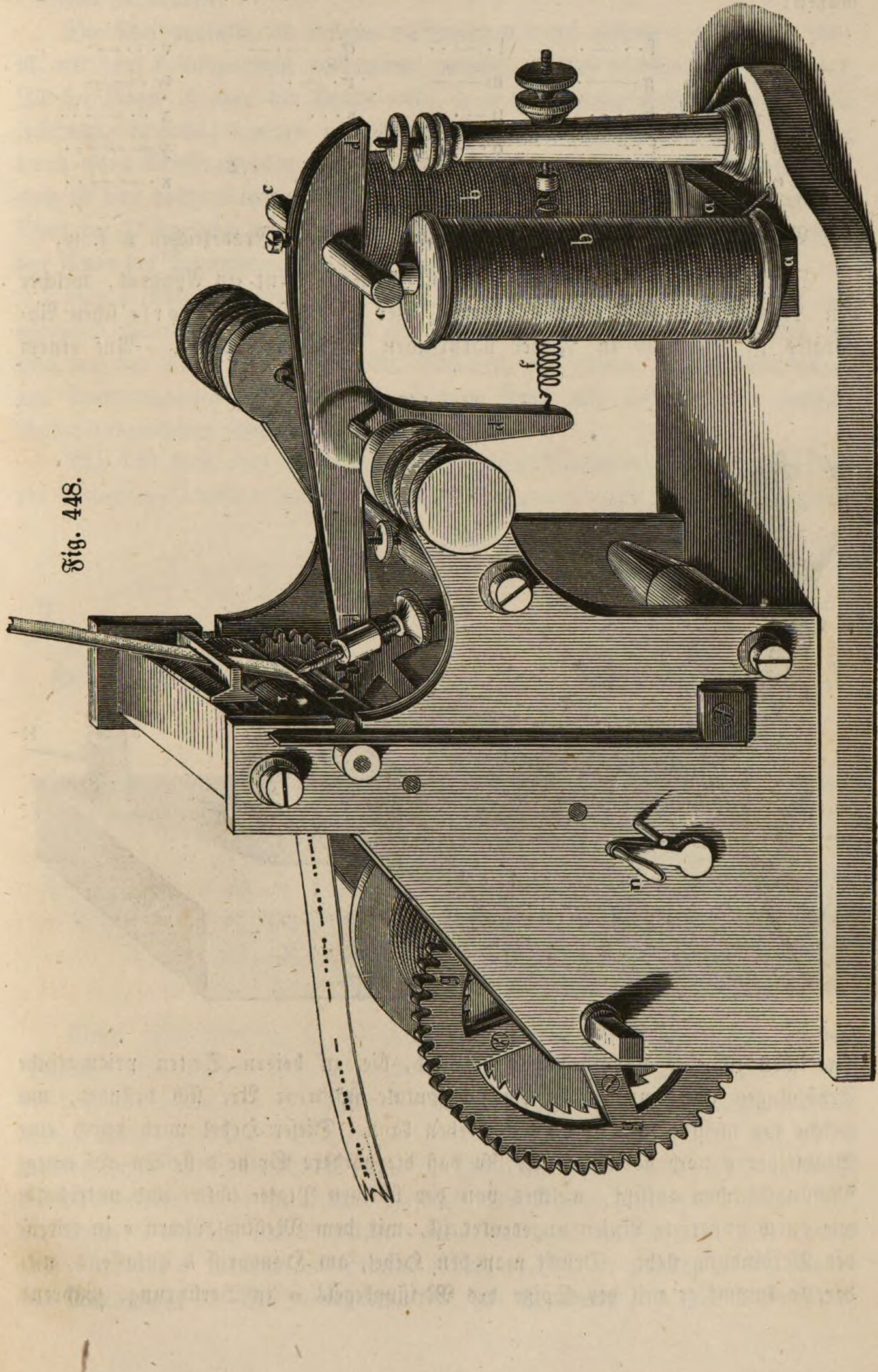


Fig. 448.

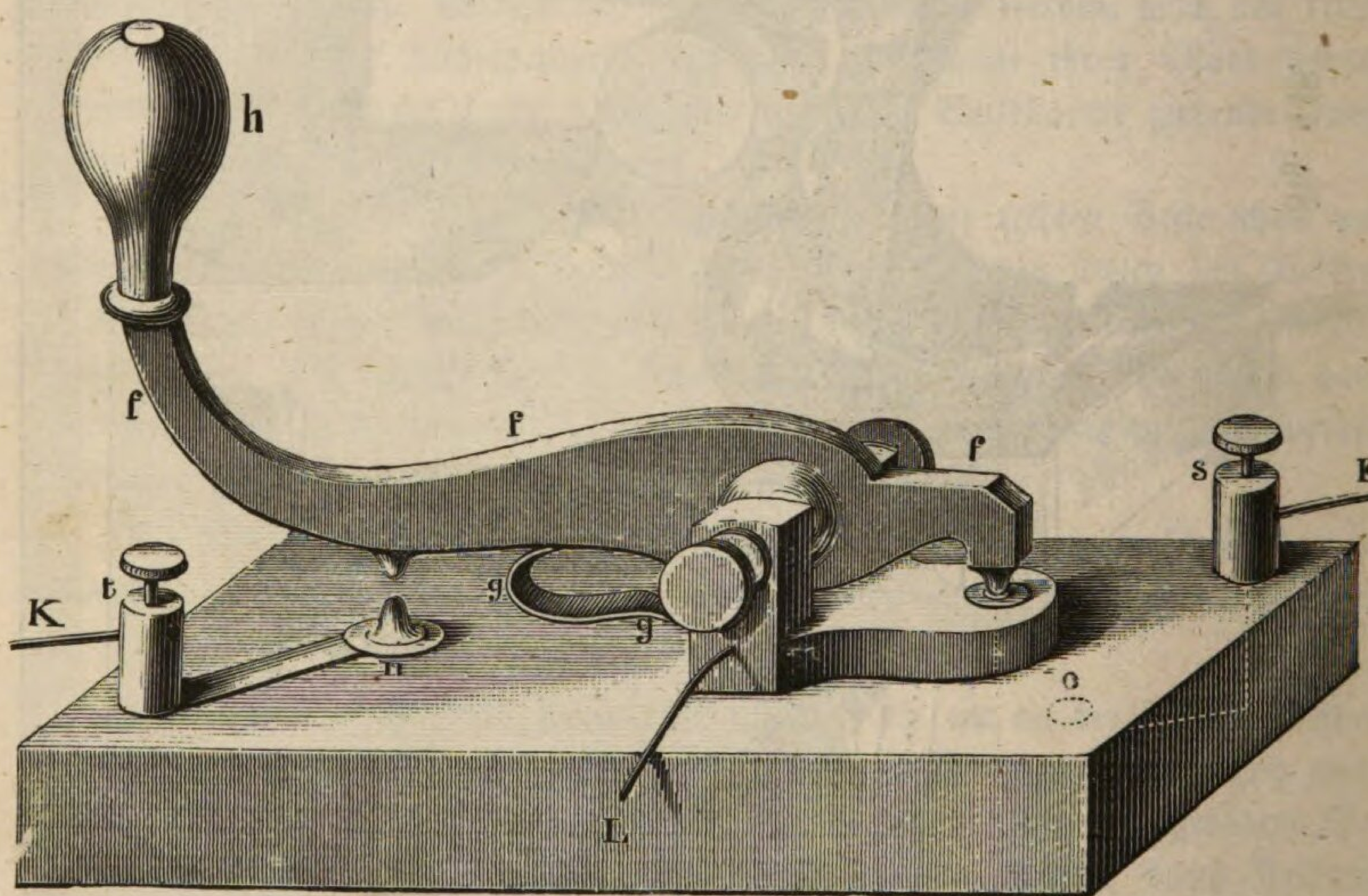
Papier; bleibt aber der Strom einige Zeit geschlossen, so entsteht ein Strich, weil ja das Papier unterdessen fortgezogen wird. Aus Punkten und Strichen ist nun das Alphabet zusammengesetzt, und zwar das bei uns übliche folgendermaßen:

a · —	f · · — ·	l · — · ·	q — — · —	v · · · —
b — · · ·	g — — ·	m — —	r · — ·	w · — —
c — · — ·	h · · · ·	n — ·	s · · ·	x · · — · · ·
d — · ·	i · ·	o · — · · ·	t —	y — — · · ·
e .	k — · —	p · · · · ·	u · · —	z · — — — · ·

Aehnliche Zeichen hat man für Zahlen, Punctum, Fragezeichen u. s. w.

Zum sicheren Schließen und Oeffnen der Kette dient ein Apparat, welcher den Namen des **Schlüssels** führt. Der Schlüssel des **Morse**'schen Apparates ist Fig. 449 in ½ der natürlichen Größe abgebildet. Auf einem

Fig. 449.



Brettchen ist eine Messingplatte befestigt, die zu beiden Seiten prismatische Erhöhungen hat, in welchen die horizontale stählerne Axe sich befindet, um welche der messingene Hebel *f* sich drehen kann. Dieser Hebel wird durch eine Stahlfeder *g* nach vorn gedrückt, so daß die vordere Spitze desselben auf einem Messingstückchen aufsitzt, welches von der übrigen Platte isolirt und unterhalb, wie durch punktirte Linien angedeutet ist, mit dem Messingsäulchen *s* in leitender Verbindung steht. Drückt man den Hebel, am Handgriff *h* anfassend, nieder, so kommt er mit der Spitze des Messingkegels *n* in Berührung, während

die vordere Spitze des Hebels nun in die Höhe gehoben ist, also nicht mehr mit dem Säulchen *s* in leitender Verbindung steht.

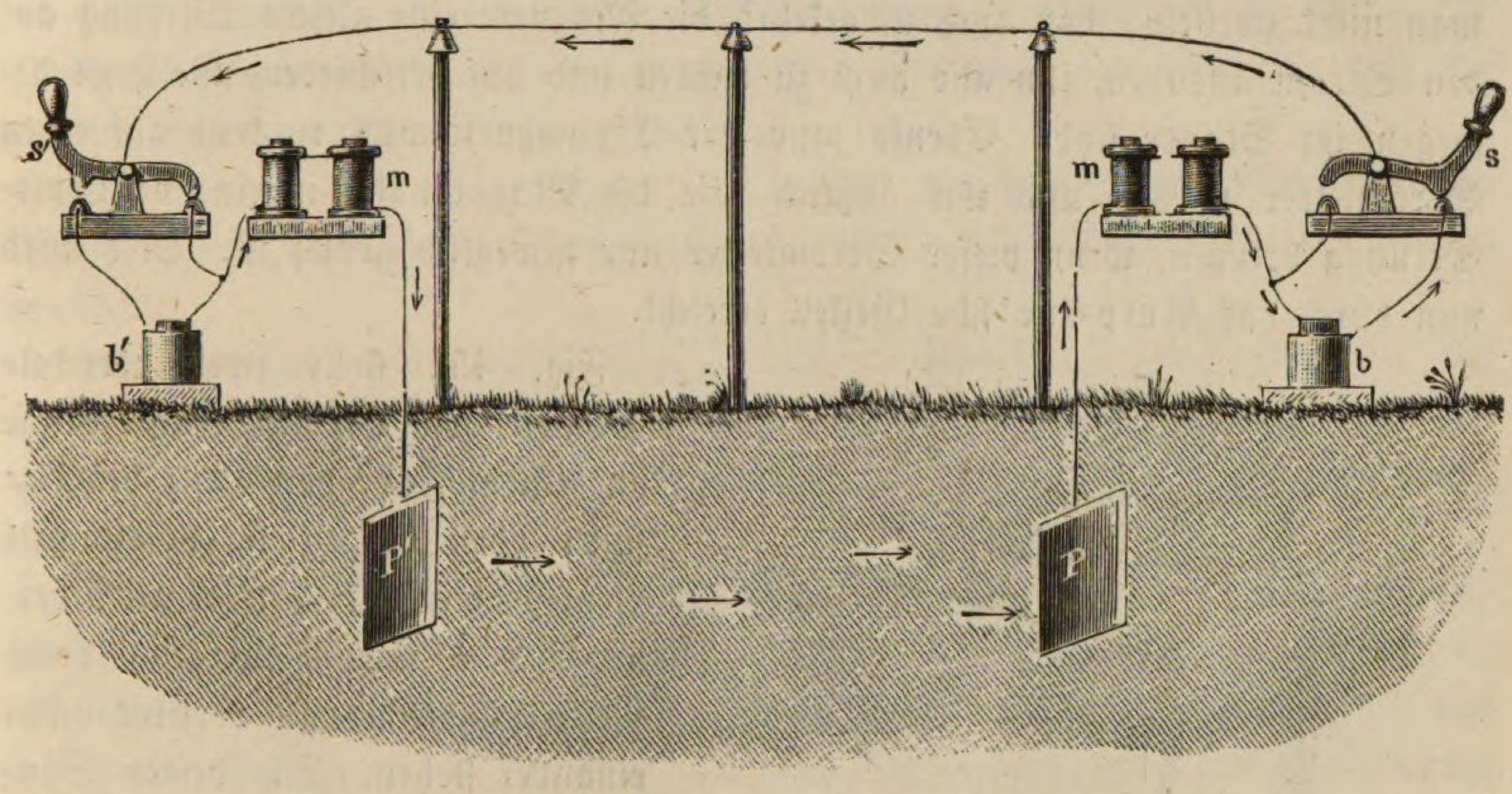
Der kleine Messingkegel *n* ist durch einen Messingstreifen mit dem Säulchen *t* leitend verbunden.

Die Messingplatte, an welcher die Axenträger des Hebels *f* angebracht sind, ist mit dem Leitungsdraht verbunden, welcher zu der nächsten Station führt. In der Regel ist aber der Draht nicht so in der Platte befestigt, wie es die Zeichnung darstellt, sondern es befindet sich ein Messingsäulchen bei *o*, welches durch einen Messingstreifen mit dem Messinggestell verbunden ist. Dieses Säulchen ist nun deshalb in der Zeichnung weggelassen worden, weil es den vorderen Theil der Platte und des Hebels verdeckt hätte. In dieses Säulchen *o* ist dann das Ende des Leitungsdrahtes eingeschraubt.

Von *t* führt ein Draht zu dem einen Pol, etwa dem Kupferpol der galvanischen Batterie. Von *s* geht ein Draht aus, der sich alsbald spaltet, indem der eine Theil zum Zinkpol der Batterie, der andere zu den Windungen des Elektromagneten führt, deren anderes Ende mit einer in den feuchten Boden vergrabenen Kupferplatte verbunden ist.

Fig. 450 stellt zwei mit einander verbundene Stationen dar. *b* und *b'* sind die Batterien, *s* und *s'* sind die Schlüssel, *m* und *m'* sind die Elektromagnete.

Fig. 450.



Sind beide Schlüssel in der Ruhelage, wie es in unserer Figur bei dem Schlüssel der Station links der Fall ist, so kann kein Strom entstehen, denn bei dem Messingkegel *n* (siehe Fig. 449) findet sich eine Unterbrechung der Leitung. Wird aber der Schlüssel auf einer Station niedergedrückt, wie es in unserer Figur für die Station rechts der Fall ist, so ist der Schließungsbogen für die Batterie dieser Station hergestellt, der Strom geht vom positiven Pol der Batterie *b* durch den Schlüssel *s* zum Leitungsdraht, welcher den Strom zum Schlüssel *s'* der anderen Station führt; von diesem gelangt der Strom zu den Windungen des Elektromagneten *m'*, zur Erdplatte *P'*, geht dann durch

den Erdboden über *P* und *m* zum negativen Pol von *b* zurück, wie denn dieser Lauf des Stromes durch die Pfeile hinlänglich bezeichnet ist.

So umkreist denn der auf der Station rechts erzeugte Strom die Elektromagnete beider Stationen; die Batterie *b'* der anderen Station ist nicht geschlossen, kann also keinen Strom aussenden.

Will der Telegraphist der einen Station, etwa der rechten, eine Depesche abgehen lassen, so drückt er mehrmals rasch hinter einander seinen Schlüssel nieder, wodurch ein abwechselndes An- und Abziehen der Anker beider Elektromagnete erfolgt. Das dadurch hervorgebrachte Klappern macht den Telegraphisten der anderen Station aufmerksam, welcher nun, nachdem er auf ähnliche Weise geantwortet hat, sein Uhrwerk mittelst des kleinen Hebels *n*, Fig. 448, auslöst und seinen Streifen laufen läßt. Der Telegraphist der sprechenden Station drückt nun in den gehörigen Intervallen seinen Schlüssel nieder, um dadurch auf dem Papierstreifen der anderen Station die beabsichtigten Zeichen, Punkte und Striche, hervorzubringen. Zum Zeichen, daß die Depesche beendigt ist, macht er eine Reihe von 20 bis 30 gleichmäßig auf einander folgenden Punkten. Nun antwortet der Empfänger »verstanden«, oder er verlangt die Wiederholung etwa undeutlich gebliebener Stellen.

209 **Richtung der Ströme unter dem Einflusse des Erdmagnetismus.** Da der Strom eine Wirkung auf den Magneten hervorbringt, so konnte man nicht zweifeln, daß auch umgekehrt die Magnete eine gleiche Wirkung auf den Strom ausüben, ihn also auch zu richten und auf verschiedene Weise zu bewegen im Stande sind. Ebenso muß der Erdmagnetismus richtend auf einen Stromleiter wirken und ihn ähnlich wie die Magnetnadel in eine bestimmte Stellung bringen, wenn dieser Stromleiter nur beweglich genug ist. Dies wird nun durch das Ampère'sche Gestell erreicht.

Fig. 451.

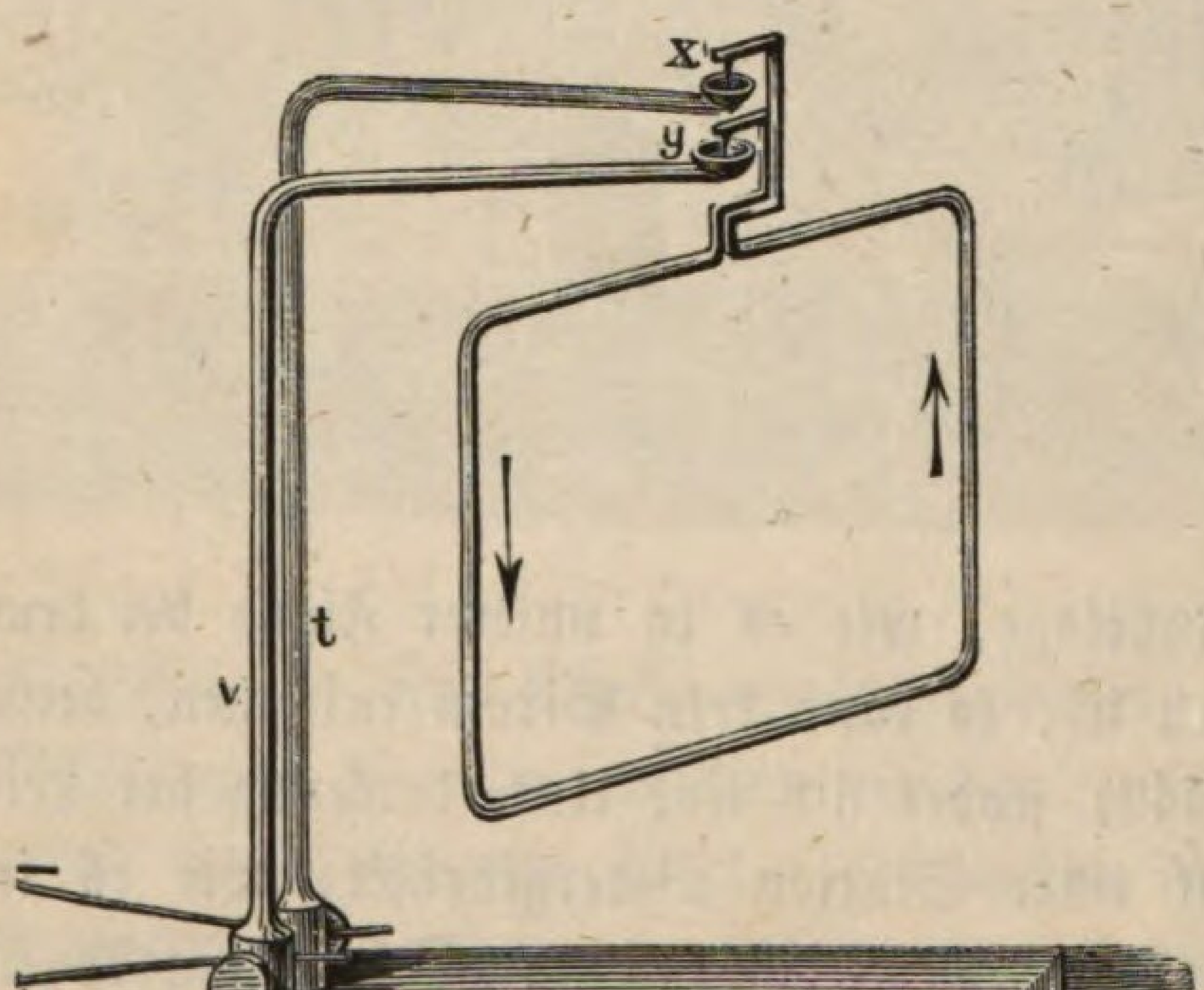


Fig. 451 stellt zwei vertikale Säulen von Messing dar, welche auf einem Fuße von Holz befestigt sind; oben tragen sie horizontale Arme, die mit den Quecksilbernäpfchen *x* und *y* endigen, deren Mittelpunkte genau vertikal unter einander stehen. Die beiden Säulen sind nirgends in leitender Berührung. Unten sind sie etwas dicker, so daß man die zu den Polen eines galvanischen Rheomotors führenden Leitungsdrähte einschrauben kann; dadurch wird das eine Quecksilbernäpfchen gewissermaßen zum positiven, das andere zum negativen Pole.

In diese Quecksilbernäpfchen wird nun ein eckiger Leitungsdraht eingehängt, wie Fig. 451, oder ein kreisförmiger, wie Fig. 452. Da, wo sich die beiden Drahtenden

Fig. 452.

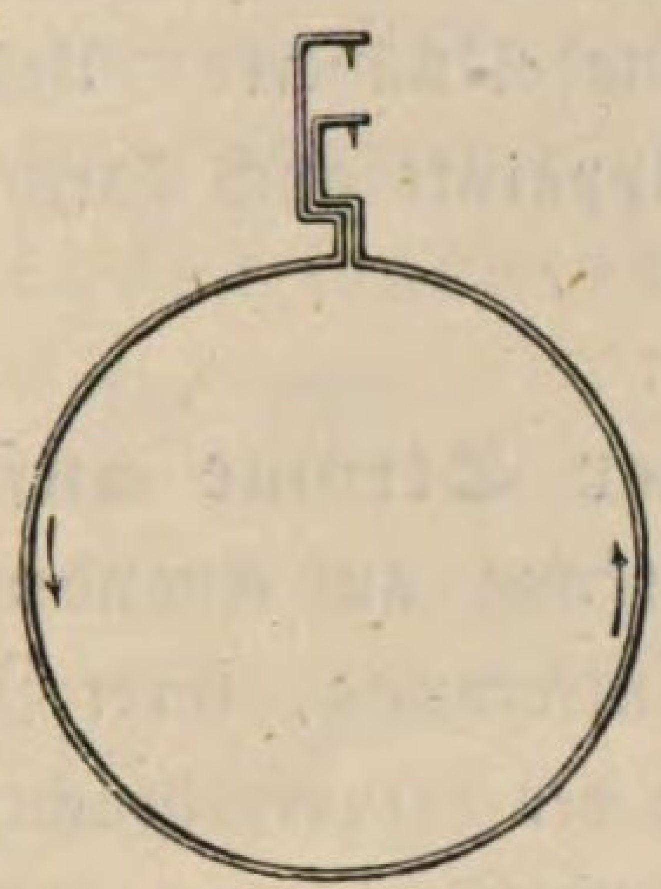
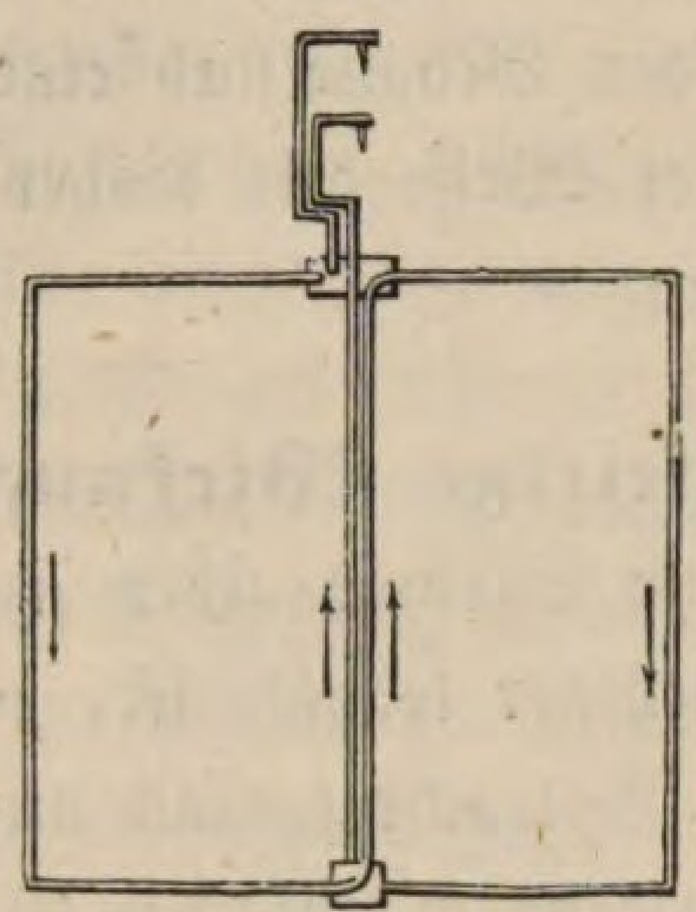


Fig. 453.



zu berühren scheinen, sind sie durch eine isolirende Substanz getrennt; sie sind oben umgebogen und mit Stahlspitzen versehen, die in die Näpfchen x und y, Fig. 451, eingetaucht werden. Die eine Spitze geht bis auf den Boden des Näpfchens und ruht hier auf einer kleinen Glasplatte, die andere Spitze taucht nur in das Quecksilber ein. Durch diese Aufhängung ist der Draht ungemein leicht beweglich.

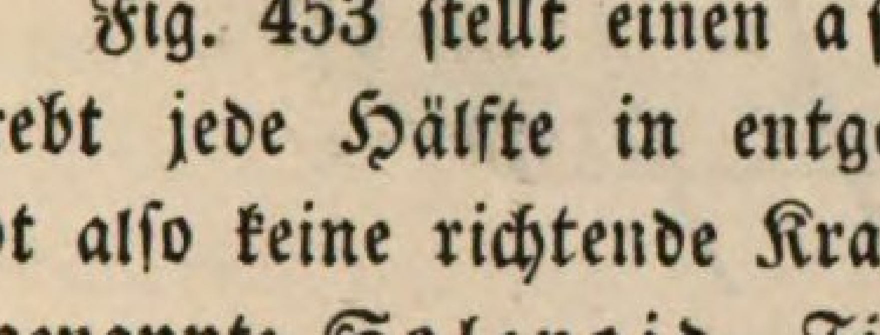
Läßt man nun einen Strom hindurchgehen, so stellt sich die Ebene des Drahtes rechtwinklig auf den magnetischen Meridian und zwar so, daß der positive Strom auf der Westseite aufsteigt.

Kehrt man den Strom um, so macht der Draht um seine vertikale Umdrehungsaxe eine halbe Umdrehung und kommt dann erst wieder ins Gleichgewicht.

Um den Strom rasch umkehren zu können, benutzt man Vorrichtungen, die unter dem Namen des Stromwenders, des Commutators oder des Gyrotrops bekannt sind. Wir können hier nicht näher auf ihre Beschreibung eingehen.

Fig. 453 stellt einen astatischen Stromleiter dar. Der Erdmagnetismus strebt jede Hälfte in entgegengesetzter Richtung zu drehen als die andere, er übt also keine richtende Kraft auf das System aus. Ein Schraubendraht, das sogenannte Solenoid, Fig. 454, an dem Ampère'schen Stativ aufgehängt und von einem Strome durchlaufen, muß sich so stellen, daß die Axe des Schraubendrahtes in die Richtung der Declinationsnadel fällt.

Fig. 454.



Es geht daraus nicht allein hervor, daß auf diese Weise die Declinationsnadel durch einen Schraubendraht nachgeahmt werden kann, sondern auch, daß der Südpol derjenige ist, in welchem sich, wenn man ihn von seiner Seite her betrachtet, der Strom bewegt, wie der Zeiger einer Uhr.

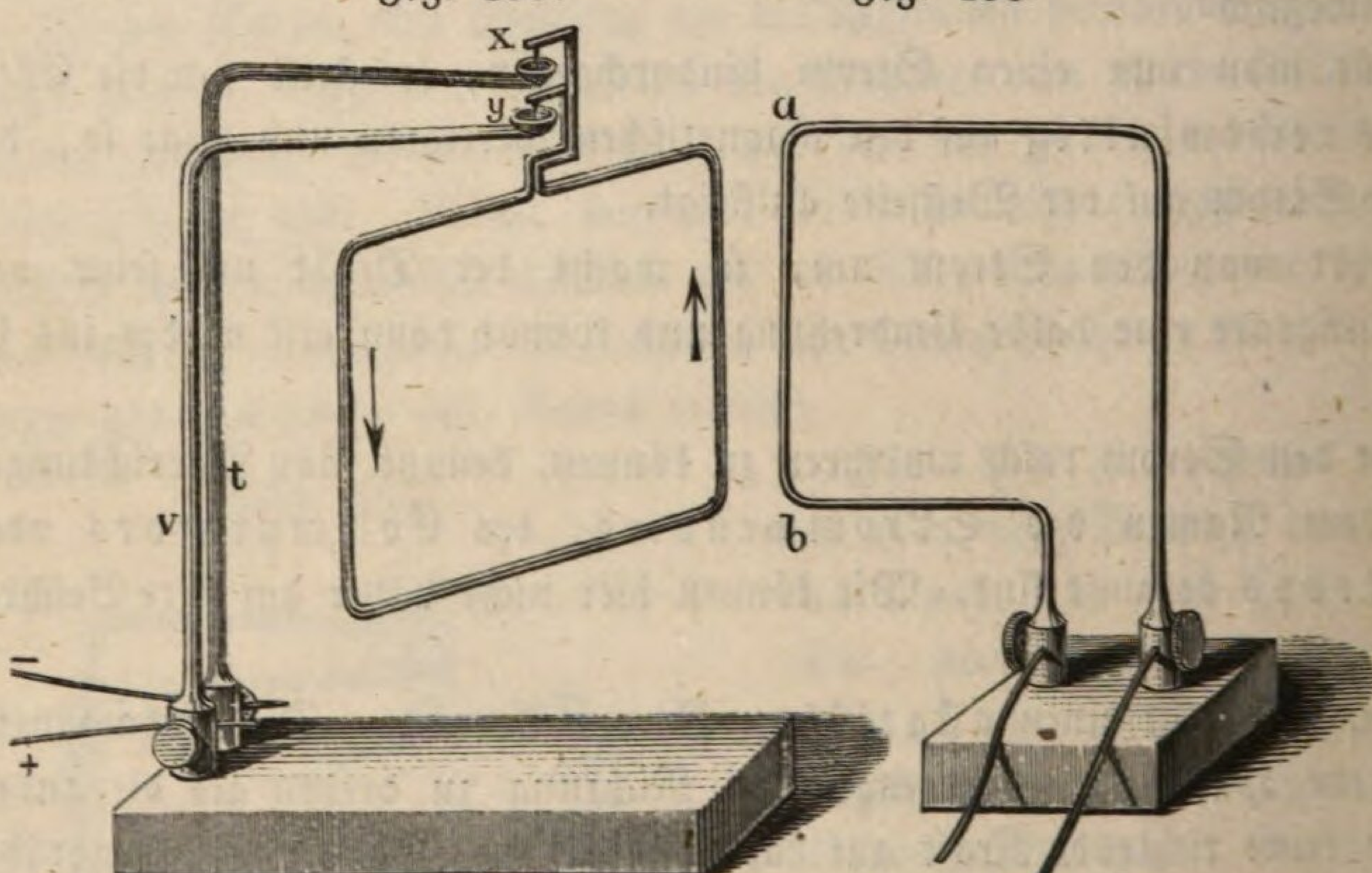
Das Brettchen, welches den verschiedenen Windungen des Schraubendrahtes Fig. 454 zur Befestigung dient, besteht aus einer nichtleitenden Substanz.

Wenn man den Schraubendrähten, welche wir soeben betrachtet haben, einen Magnetstab nähert, so kann man ganz ähnliche Erscheinungen beobachten, als ob man den Magnetstab einer Declinationsnadel näherte. Ueberhaupt werden natürlicher Weise alle bisher betrachteten Apparate auch durch Magnetstäbe afficirt werden.

210 **Gegenseitige Wirkung galvanischer Ströme auf einander.** Zwei parallele Ströme üben immer eine Wirkung auf einander aus, welche mehr oder weniger lebhaft ist, je nach ihrer Entfernung, ihrer Intensität und ihrer Länge. Betrachtet man nun die Richtung der hervorgebrachten Bewegung, so ist diese folgendem einfachen Gesetze unterworfen: Zwei parallele Ströme ziehen sich an, wenn sie sich in gleicher Richtung bewegen, sie stoßen sich aber ab, wenn ihre Richtung entgegengesetzt ist.

Das Gesagte läßt sich mit Hülfe des Ampère'schen Gestelles in folgender Art nachweisen: Man hänge in die Quecksilbernäpfchen *x* und *y* einen rechtwinkligen Stromleiter, wie Fig. 455 zeigt, und stelle daneben das, einen rechtwinklig gebogenen Leitungsdraht tragende, Brettchen Fig. 456 so auf, daß das vertikale Drahtstück *ab* sich in der Nähe eines der vertikalen Stromarme des beweglichen Leiters befindet. Man beobachtet nun eine Abstoßung oder eine Anziehung zwischen den benachbarten vertikalen Stromarmen, je nachdem in ihnen der Strom entgegengesetzt oder gleich gerichtet ist.

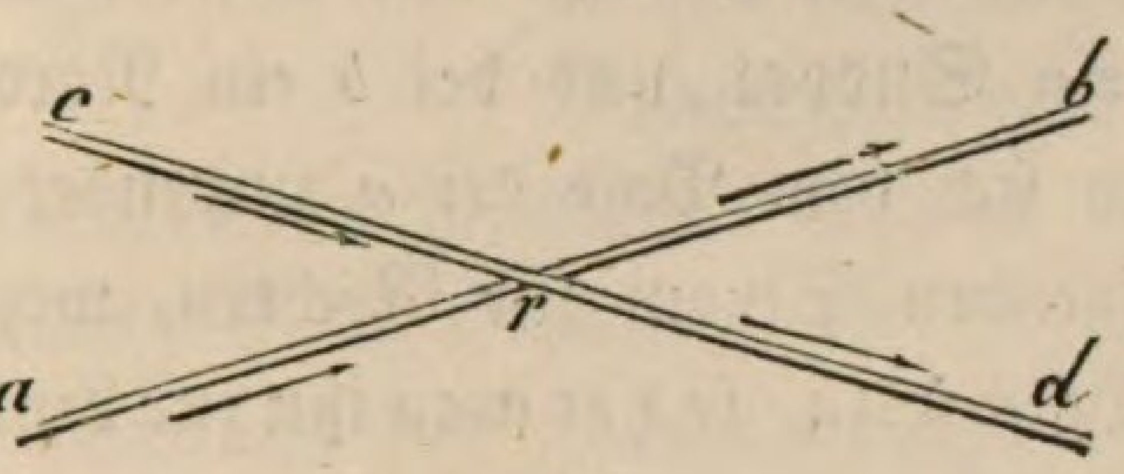
Fig. 455. Fig. 456.



Wir nennen gekreuzte Ströme diejenigen, die nicht parallel sind, mögen sie nun in einer Ebene liegen und ihre Richtungen sich schneiden, oder mögen sie in verschiedenen Ebenen liegen, so daß sie sich nicht treffen. Im ersten Falle ist der Kreuzungspunkt derjenige, in welchem sie sich schneiden, im zweiten Falle ist es ein Punkt der kürzesten Entfernung beider Ströme. Zwei gekreuzte

Ströme streben sich immer parallel zu stellen, um sich nach einer Richtung zu bewegen, oder mit anderen Worten: es findet Anziehung zwischen den Theilen des Stromes Statt, welche nach dem Kreuzungspunkte hingehen, und dann wieder zwischen denen, welche vom Kreuzungspunkte abgehen. Abstoßung aber findet Statt zwischen einem Strome, welcher sich nach dem Kreuzungspunkte hin bewegt, und einem anderen, welcher von ihm weggeht.

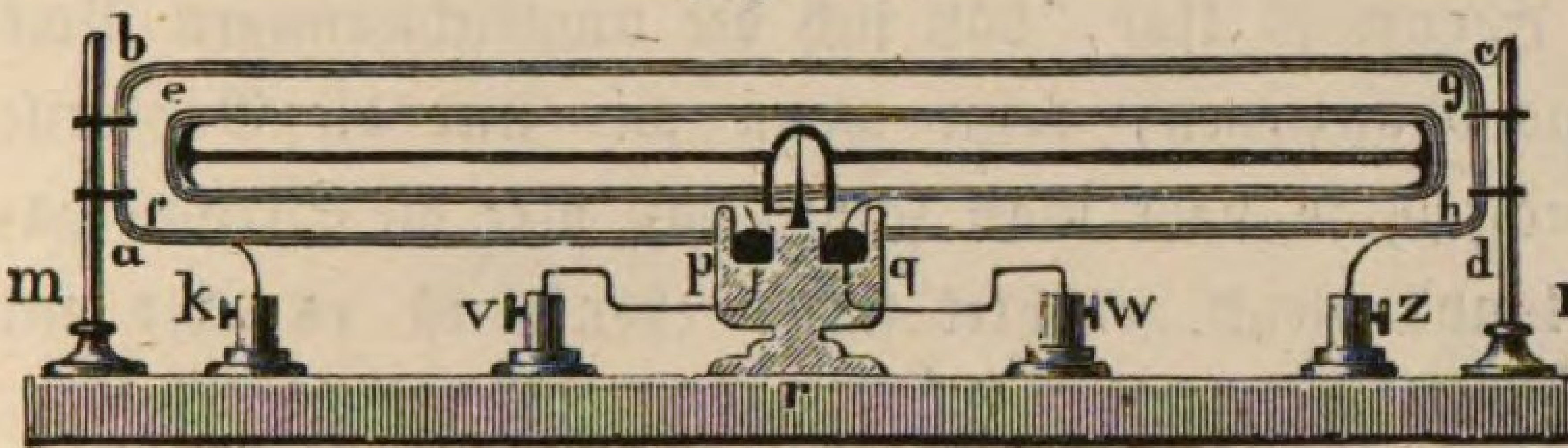
Fig. 457.



Sind z. B. *ab* und *cd*, Fig. 457, zwei Ströme, deren Kreuzungspunkt *r* ist, so findet eine Anziehung zwischen den Theilen *ar* und *cr* Statt, in welchen der Strom nach dem Kreuzungspunkte hingeht, und zwischen den Theilen *rb* und *rd*, in welchen er vom Kreuzungspunkte abgeht. Abstoßung findet zwischen *ar* und *rd*, ferner zwischen *cr* und *rb* Statt.

Es läßt sich dies sehr gut mit Hülfe des Garthe'schen Apparates, Fig. 458, nachweisen, welcher im Wesentlichen aus zwei Rahmen von umsponnenem Kupferdrahte besteht, von denen der äußere fest, der innere hingegen auf einer Spitze drehbar ist, wie eine Magnetnadel. Die Enden des beweglichen Drahtrahmens tauchen in eine kreisförmige Quecksilberrinne, welche durch eine elfenbeinerne Scheidewand (rechtwinklig zur Ebene des Papiers) in zwei halbkreisförmige Theile geschieden ist; die eine Hälfte ist mit dem positiven, die andere mit dem negativen Pole eines constanten Bechers verbunden, während der Strom eines anderen Bechers den äußeren Rahmen durchläuft.

Fig. 458.



Ampère's Theorie des Magnetismus. Das Princip dieser Theorie 211
besteht darin, jedes Molekül eines Magneten als von einem Strome gleichsam eingehüllt zu betrachten, welcher, das Molekül beständig umkreisend, in sich selbst zurückkehrt und den man der Einfachheit wegen als kreisförmig annehmen kann. Man stellt sich nach dieser Theorie jeden auf der Axe des Magneten rechtwinkligen Querschnitt ungefähr auf die durch Fig. 459 anschaulich gemachte Weise

Fig. 459.

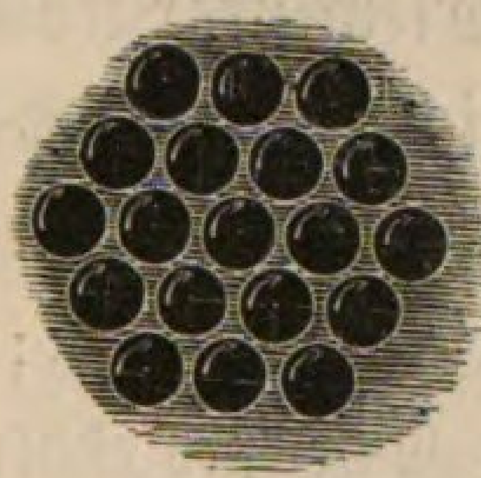


Fig. 460.



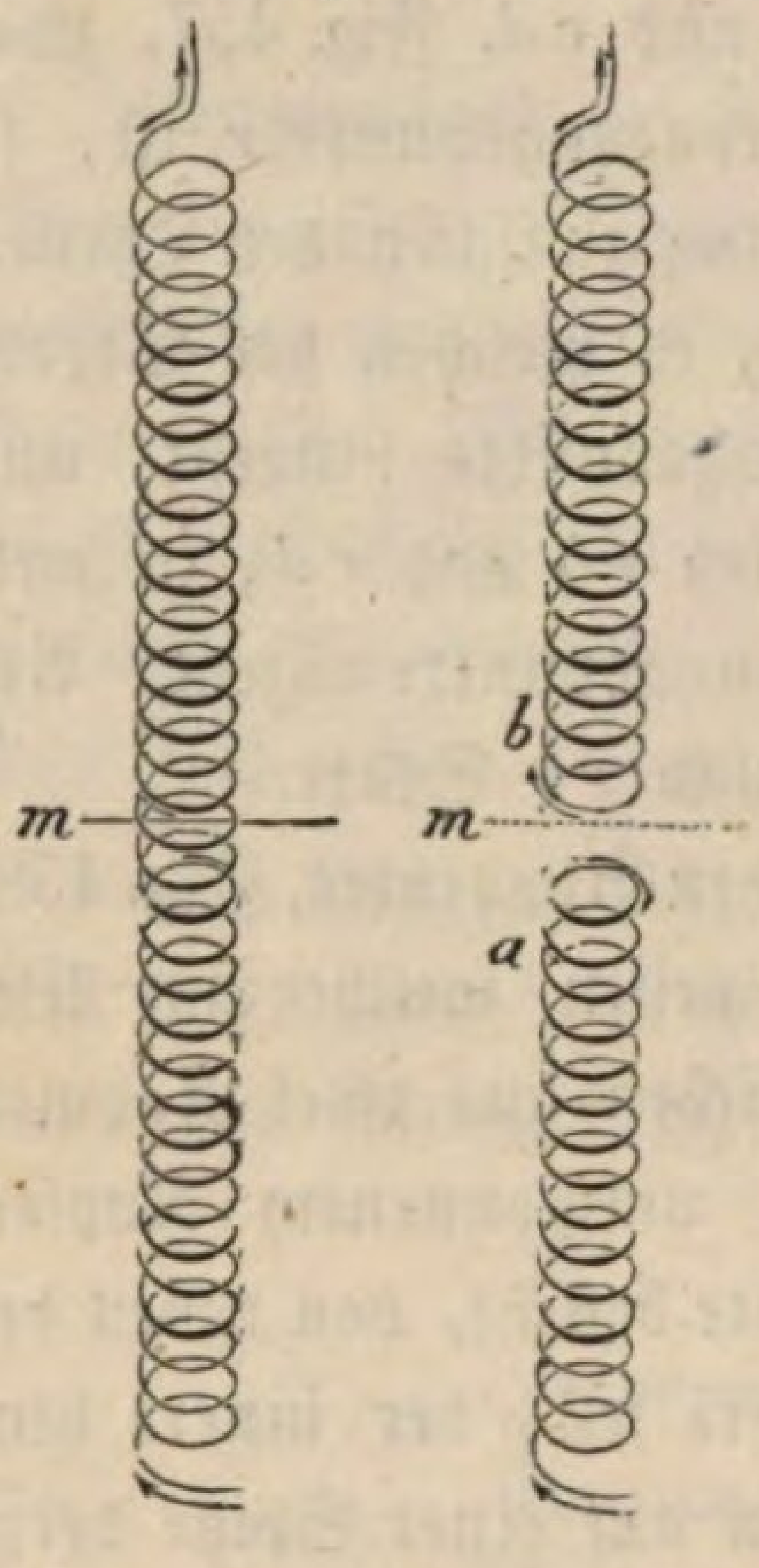
vor. Statt aller der elementaren Ströme eines jeden Querschnitts aber kann man sich denselben von einem einzigen Strome umkreist denken, welcher gleichsam

die Resultirende aller elementaren Ströme dieses Querschnitts ist, und somit läßt sich ein Magnetstab als ein System unter sich paralleler geschlossener Ströme denken, ungefähr so, wie es Fig. 460 (s. v. S.) anschaulich macht.

Was hier von einem Magnetstabe gesagt ist, läßt sich auch auf eine Magnetnadel, kurz auf jeden Magneten, welche Form er auch haben mag, anwenden.

Denken wir uns einen Schraubendraht, Figur 461, welchen der Strom in der Richtung der Pfeile durchläuft; denken wir uns denselben ferner bei *m* durchgeschnitten und die beiden Theile von einander entfernt, so folgt aus unserer Definition, daß bei *a* ein Südpol und bei *b* ein Nordpol ist; denn wenn man sich dem Pole bei *a* zuwendet, so hat man den aufsteigenden Strom zur Rechten, wendet man sich aber dem Pole *b* zu, so hat man ihn zur Linken.

Fig. 461.



Schneidet man also einen Schraubendraht rechtwinklig zu seiner Axe durch, so entstehen zwei ungleichnamige Pole, gerade so, wie wenn man einen Magneten durchbricht.

Ferner ist klar, daß sich die ungleichnamigen Pole *a* und *b* anziehen, denn wenn wir nur die Endkreise betrachten, so sieht man schon, daß hier die Ströme parallel und gleich gerichtet sind: ebenso ist es aber mit allen anderen.

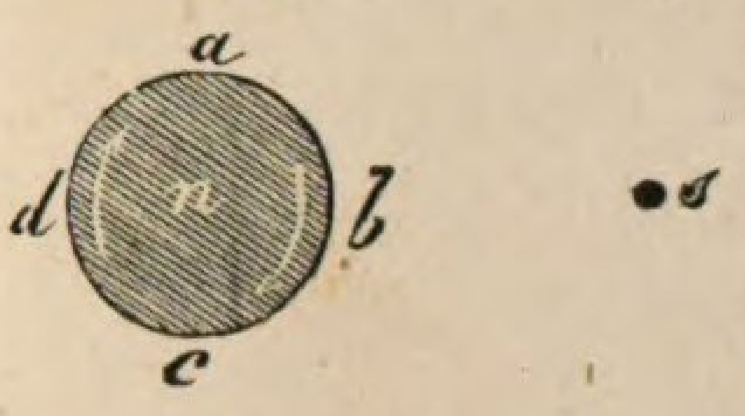
Um die Erklärung der Anziehung und Abstoßung der Pole in verschiedenen Stellungen der Magnete gegen einander recht anschaulich zu machen, zeichne man am besten auf Cylinder von Holz oder Pappe, die ungefähr 1 bis 1,5 Fuß lang sind und 2 bis 3 Zoll im Durchmesser haben, Pfeile in der Weise, wie man Fig. 460 sieht, welche die Richtung der Ströme darstellen; ferner bezeichne man noch auf beiden Cylindern die gleichnamigen Pole auf dieselbe Weise, etwa die Nordpole mit +, die Südpole mit —. Mit Hülfe zweier solcher Modelle läßt sich leicht begreiflich machen, warum gleichnamige Pole sich immer abstoßen, ungleichnamige immer anziehen, in welcher Weise man sie auch übrigens einander nähern mag.

Nach dieser Theorie muß man also annehmen, daß die Eisentheilchen beständig von den erwähnten Elementarströmen umkreist werden, die auf ihrem Wege um das Eisenmolekül keinen Leitungswiderstand zu überwinden haben; denn sonst könnten sie ohne fortwirkende elektromotorische Kraft nicht continuirlich seyn. In einem Stahlmagneten sind nun diese Elementarströme einander parallel, im weichen Eisen aber haben sie alle möglichen verschiedenen Lagen. Die Magnetisirung des weichen Eisens besteht nach dieser Theorie darin, daß die schon vorhandenen Elementarströme parallel gerichtet werden; die Gränze der Magnetisirung ist erreicht, wenn die Ströme aller Eisenmoleküle die gleiche Lage haben. Hört die magnetisirende Kraft zu wirken auf, so kehren die Ströme wieder in ihre vorherige regellose gegenseitige Lage zurück; nur im Stahl behal-

ten sie wenigstens theilweise ihren Parallelismus bei, und darauf beruht das Bleiben des Magnetismus des Stahls.

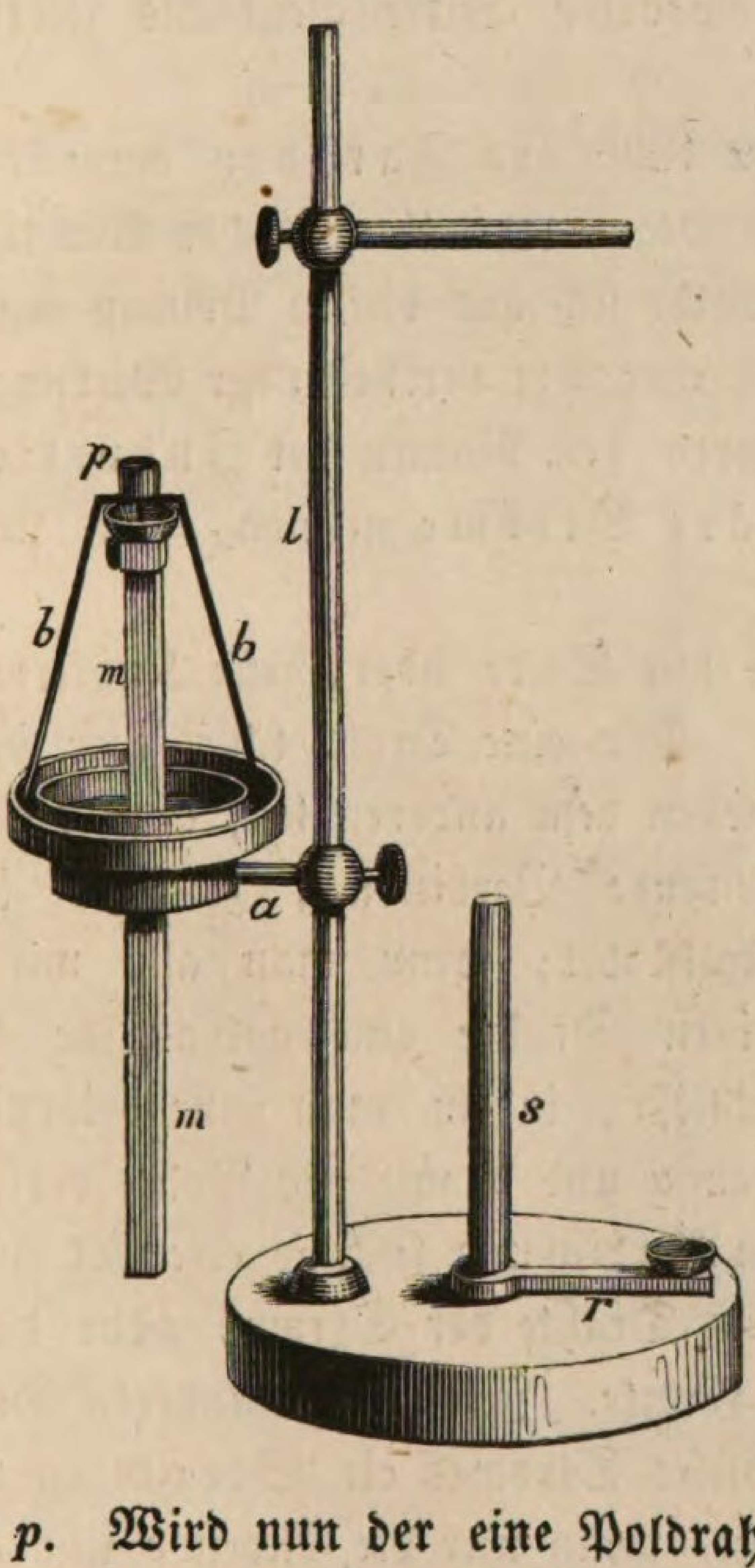
Rotation beweglicher Ströme und Magnete. Es sei *abcd*, 212
Fig. 462, der horizontale Durchschnitt eines vertikal stehenden Magneten und *s* ein zum Punkt verkürzt erscheinender vertikaler Strom, den wir aufsteigend annehmen wollen und welcher um die Axe des Magneten drehbar ist, so ist nach den oben auseinandergesetzten Principien klar, daß das Stück *ab* des Magnetstromes den Strom *s* abstoßen, *bc* aber ihn anziehen wird; der Strom *s* muß also in der Richtung des Stromes im Magneten rotiren. Wäre der Strom *s* niedergehend, so würde die Richtung der Rotation die entgegengesetzte werden; ebenso wird natürlich die Umkehrung der Rotationsrichtung durch eine Umkehrung der magnetischen Pole bewirkt.

Fig. 462.



Eine solche Rotation kann mit Hülfe des Apparates Fig. 463 hervorgebracht werden. An einem vertikalen Stabe *l* ist ein horizontaler Stab *a* verschiebbar, so daß man ihn in jeder beliebigen Höhe und in jeder Richtung mit Hülfe einer Schraube feststellen kann. Dieser horizontale Stab trägt einen Messingring, auf welchen eine kreisförmige hölzerne, mit Quecksilber zu füllende Rinne aufgesetzt wird. In dem Messingringe steckt eine Korkscheibe, durch deren Mitte ein vertikaler Magnetstab hindurchgeht, an welchem oben eine Hülse mit einem Quecksilbernäpfchen angeschraubt ist. In diesem Näpfchen sitzt eine feine Spitze auf, welche einen kupfernen Bügel *b* trägt, der auf beiden Seiten heruntergebogen ist, so daß seine unteren mit einer Platinspitze versehenen Enden in die Quecksilberrinne eintauchen. In der Mitte dieses Kupferbügels befindet sich ein Quecksilbernäpfchen *p*. Wird nun der eine Poldraht der Kette in dieses Quecksilbernäpfchen *p*, der andere oben in die Rinne getaucht, so durchläuft der Strom die beiden Arme des Kupferbügels, welcher alsbald zu rotiren beginnt.

Fig. 463.



Die Wirkung des Magneten auf den Strom in dem einen Arme des Kupferbügels wird durch die Wirkung unterstützt, welche der Magnet auf den Strom im anderen Arme des Kupferbügels hervorbringt.

Auf ähnliche Weise läßt sich auch eine Rotation eines beweglichen Magneten um einen festen Strom und die Rotation eines beweglichen Stromes um einen festen Strom hervorbringen; man hat die Apparate, welche zur Hervorbringung solcher Rotationen dienen, auf die mannigfachste Weise abgeändert.

Vierte Abtheilung.

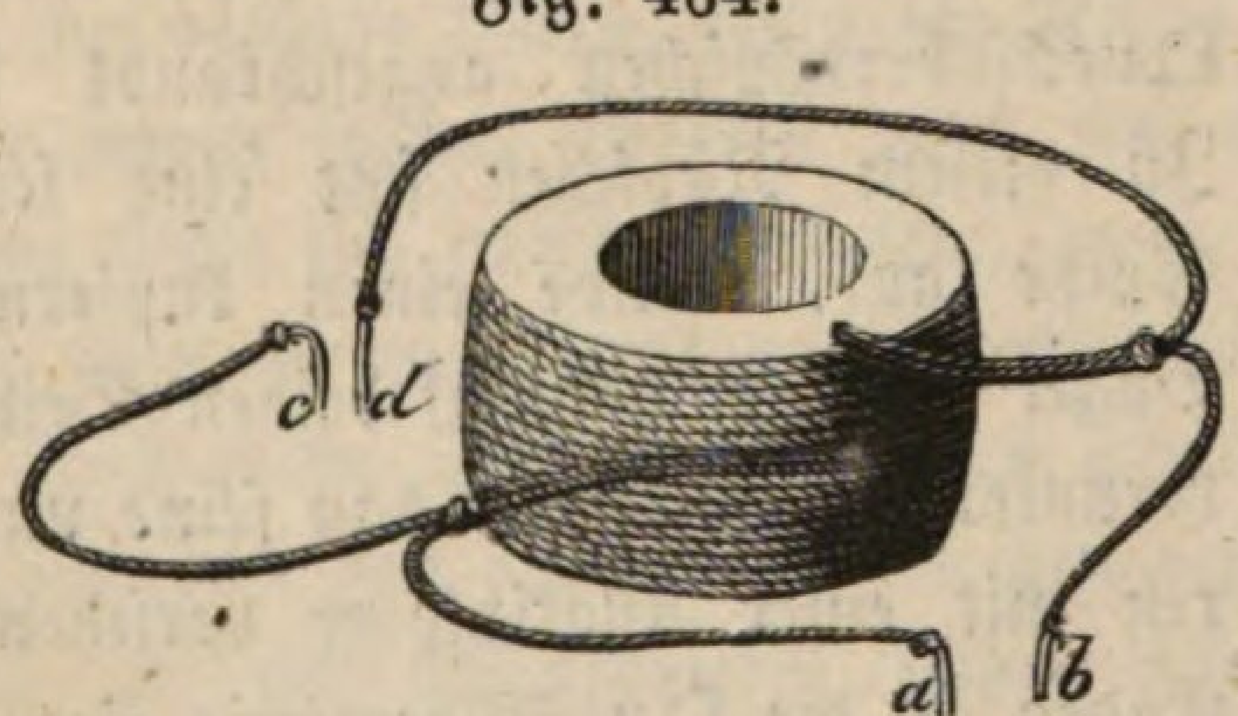
Inductionserscheinungen.

213 **Induction im Nebendraht.** Ein elektrischer Strom kann im Momente seines Beginnens oder Aufhörens oder auch durch bloße Annäherung oder Entfernung in einem anderen benachbarten Leiter gleichfalls elektrische Ströme erzeugen.

Diese Erscheinungen wurden im Jahre 1838 von Faraday entdeckt und verdienen die größte Aufmerksamkeit, theils wegen ihrer theoretischen Wichtigkeit, theils wegen der zahlreichen Thatsachen, welche sich aus diesem Princip ergeben. Diese Ströme, welche in den Leitern durch eine Art vertheilender Wirkung anderer Ströme hervorgebracht werden, führen den Namen der Inductionsströme. Man könnte sie auch temporäre Ströme nennen, weil sie nur einen Augenblick dauern.

Auf eine Spule von Holz seyen zwei mit Seide überzogene Kupferdrähte so aufgewickelt, wie man Fig. 464 sieht. Der eine Draht läuft hier immer neben dem anderen her, ohne daß eine leitende Verbindung zwischen ihnen stattfindet; wenn man also mit dem einen Drahte eine galvanische Kette schließt, indem man seine beiden Enden *a* und *b* mit den Polen derselben in Verbindung setzt, so circulirt in diesem Drahte der Strom, ohne daß er jedoch auf den anderen Draht übergehen könnte. In diesem anderen Drahte aber wird durch die vertheilende Wirkung dieses Stromes ein Strom in entgegengesetzter Richtung hervorgebracht, wenn nur die Enden *c* und *d* dieses zweiten Drahtes in leitender Verbindung sind. Diese leitende Verbindung kann man durch einen Multiplicator herstellen, indem man *c* mit dem einen, *d* mit dem anderen Ende des Multiplicatordrahtes in Verbindung bringt. In dem Augenblicke, in welchem man durch den ersten Draht die galvanische Kette schließt, zeigt eine Ablenkung der Multiplicatornadel einen Strom im Neben-

Fig. 464.



drahte an; gesetzt, der positive Strom gehe im Hauptdrahte von *a* nach *b*, so zeigt der Multiplicator einen Strom im Nebendrahte an, welcher in der **entgegengesetzten** Richtung von *d* nach *c* denselben durchläuft.

Dieser Strom im Nebendrahte ist jedoch nicht andauernd, denn die Multiplicatornadel kehrt alsbald wieder zum Nullpunkt der Theilung zurück; sobald aber der Hauptstrom unterbrochen wird, schlägt die Galvanometernadel nach der entgegengesetzten Richtung aus; sie zeigt also nun einen Strom, der den Nebendraht in der Richtung von *c* nach *d*, **also in derselben Richtung durchläuft, in welcher der eben unterbrochene Hauptstrom sich bewegt hatte.**

Ein elektrischer Strom kann also in einem nahe liegenden in sich geschlossenen Drahte im Momente seines Entstehens und seines Aufhörens Ströme induciren. **Der Strom, welcher bei der Schließung der Kette inducirt wird, hat die entgegengesetzte, der bei dem Unterbrechen der Kette inducirte dieselbe Richtung wie der Hauptstrom.**

Es ist nicht nöthig, daß der Hauptdraht und der Nebendraht auf derselben Hülse neben einander aufgewunden sind; jeder Draht kann eine besondere Spirale bilden und zwar so, daß man die eine in die Höhlung der anderen einschieben kann, wie dies z. B. bei den Spiralen *B* und *A*, Fig. 465 und 466, der Fall ist.

Fig. 465.

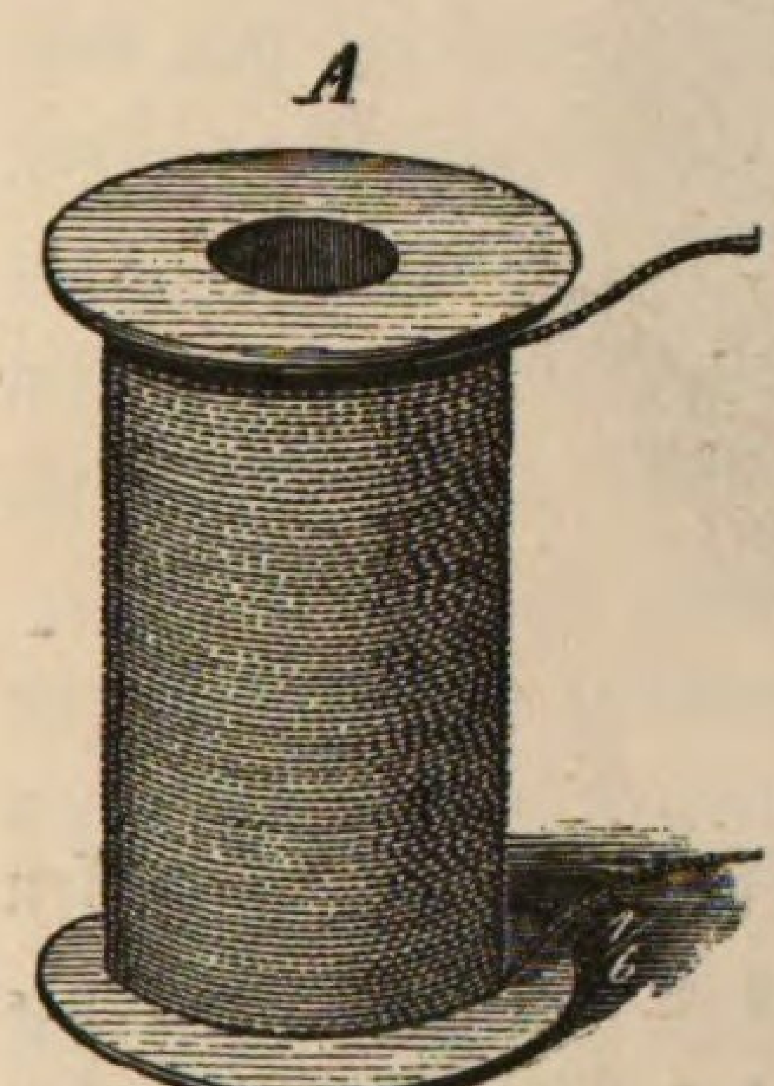
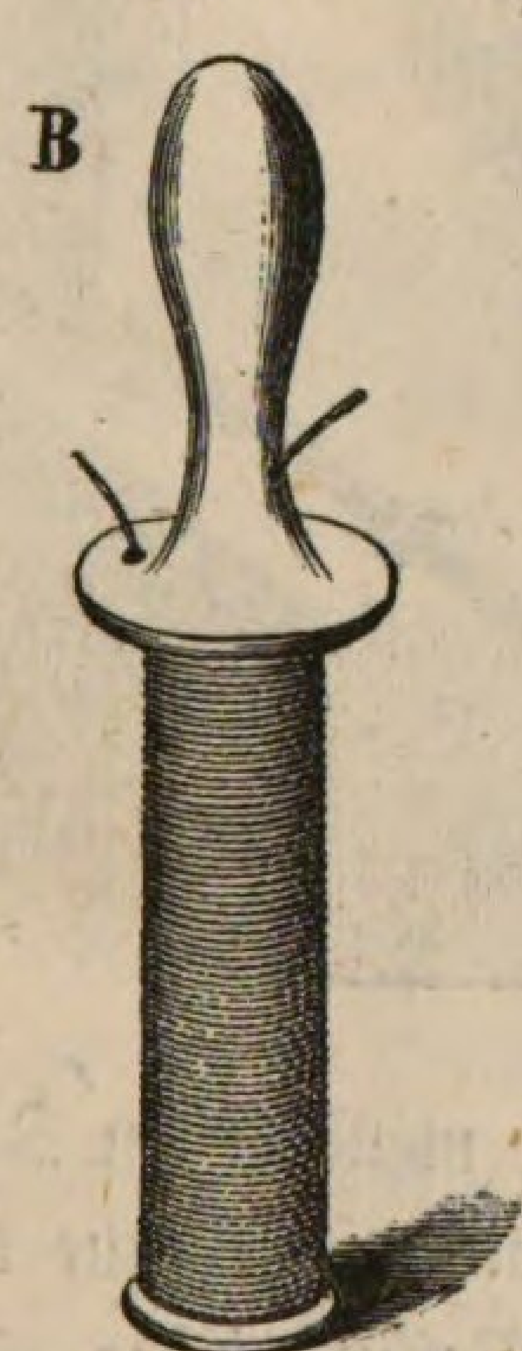


Fig. 466.



In der Regel ist die Hauptspirale von kürzerem und dickerem Draht gebildet und wird in die Höhlung der Nebenspirale eingeschoben.

Wenn man die **durchströmte** Hauptspirale in die Höhlung der Nebenspirale **einschiebt**, so wird ein Strom in derselben Weise inducirt, wie wenn der Strom in der Hauptspirale entstände. Das Herausziehen der Hauptspirale wirkt auf den Nebendraht wie das Aufhören des Hauptstromes.

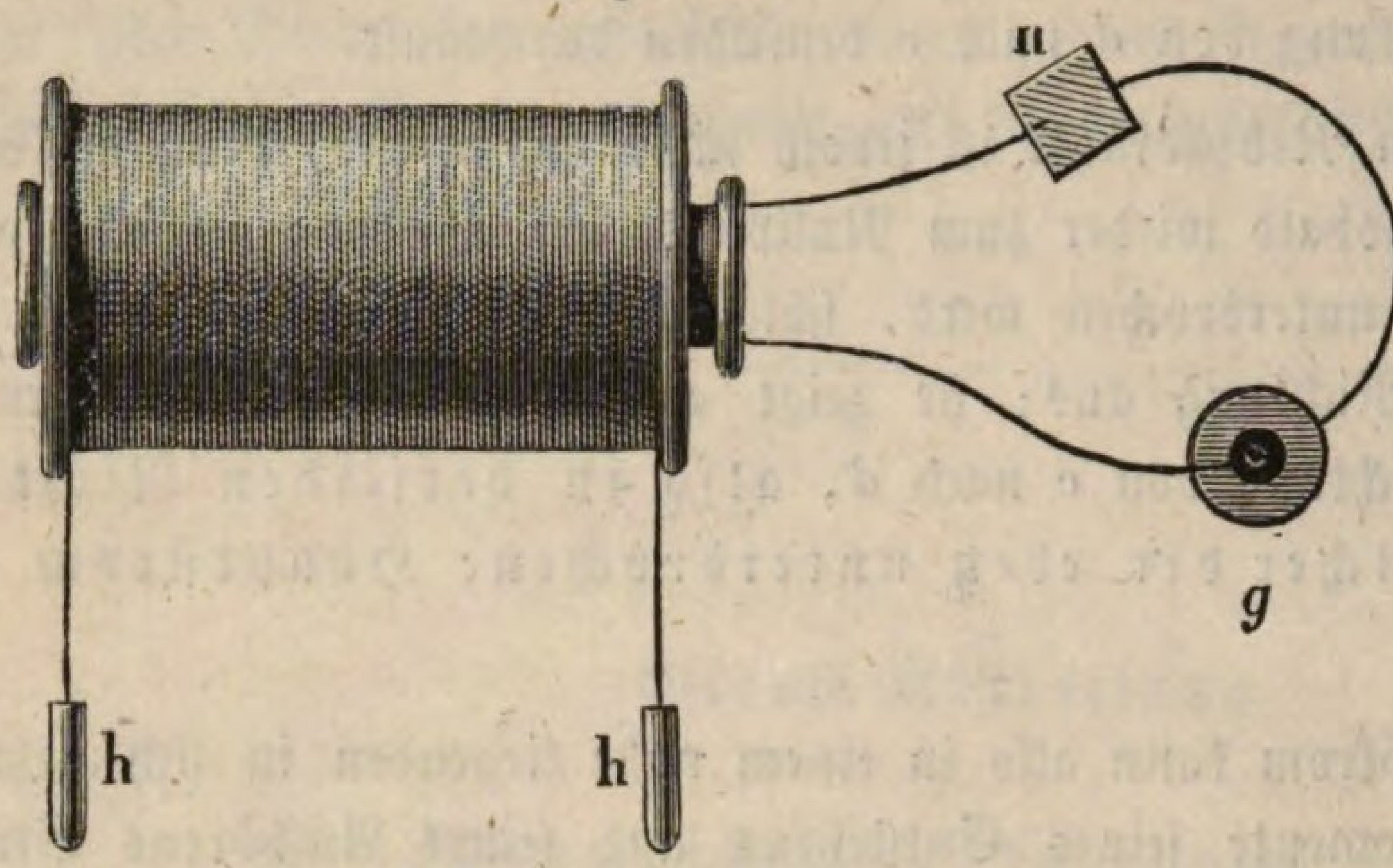
Die inducirten Ströme bringen alle Wirkungen der gewöhnlichen Ströme hervor, namentlich aber kräftige physiologische Wirkungen.

Eine solche Inductionsspirale bietet also ein treffliches Mittel, um physiologische Effecte hervorzubringen, namentlich wenn man dafür sorgt, daß die Kette in rascher Aufeinanderfolge bald geschlossen und dann wieder geöffnet wird. Man hat zu diesem Zwecke mehrere sehr sinnreiche Vorrichtungen erdacht.

Am einfachsten läßt sich dieser Zweck auf folgende Weise erreichen. Die

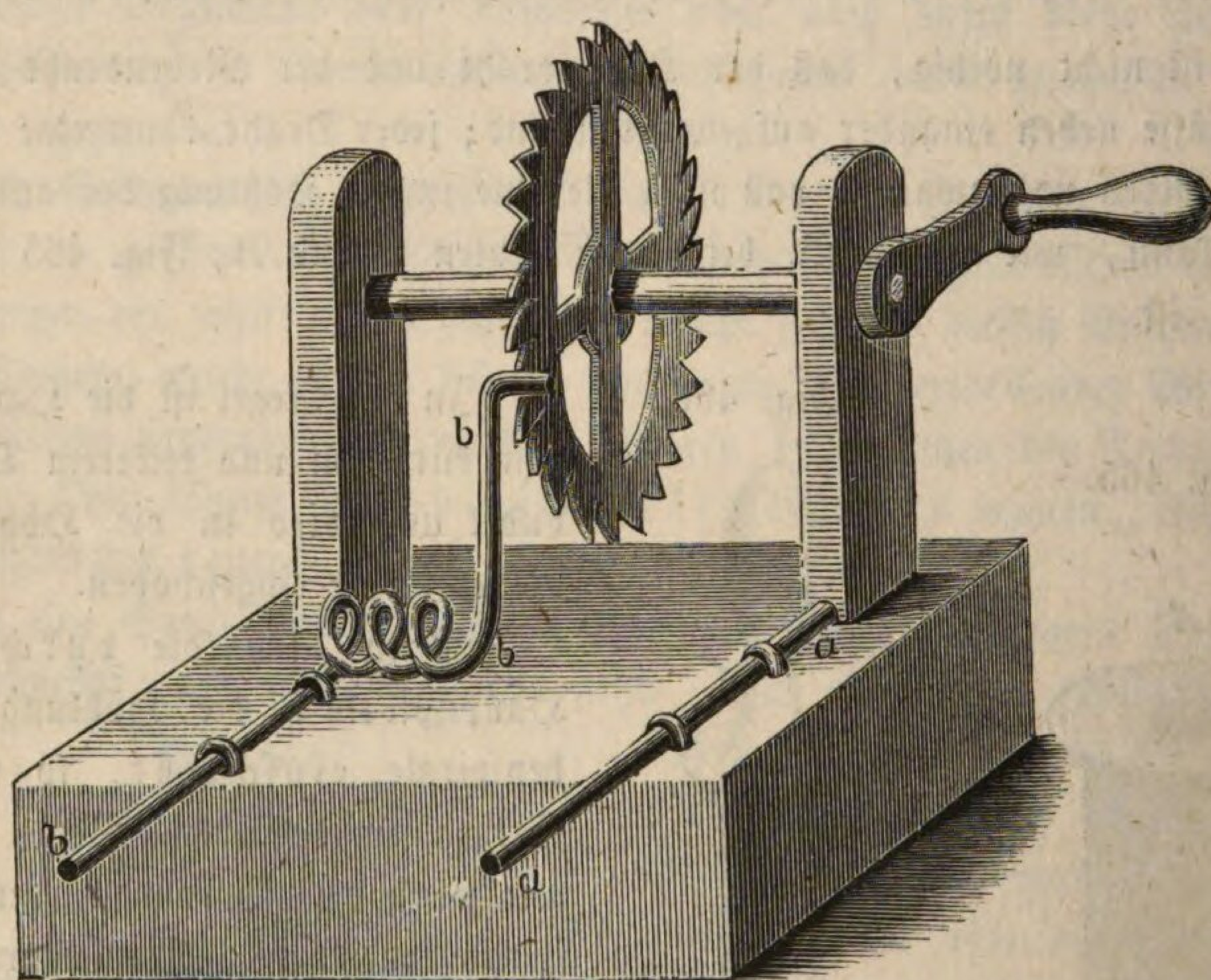
Drahtenden der Nebenspirale sind, wie Fig. 467 andeutet, mit metallenen Handgriffen *h* versehen. Mit der Hauptspirale, welche in die Nebenspirale eingesteckt ist, befindet sich aber noch ein Unterbrechungsrad bei *n* im Schließungsbogen des galvanischen Bechers *g*.

Fig. 467.



Die Einrichtung des Unterbrechungsrades ist aus Fig. 468 zu ersehen. Auf einem Holzklotz stehen zwei Messing-

Fig. 468.



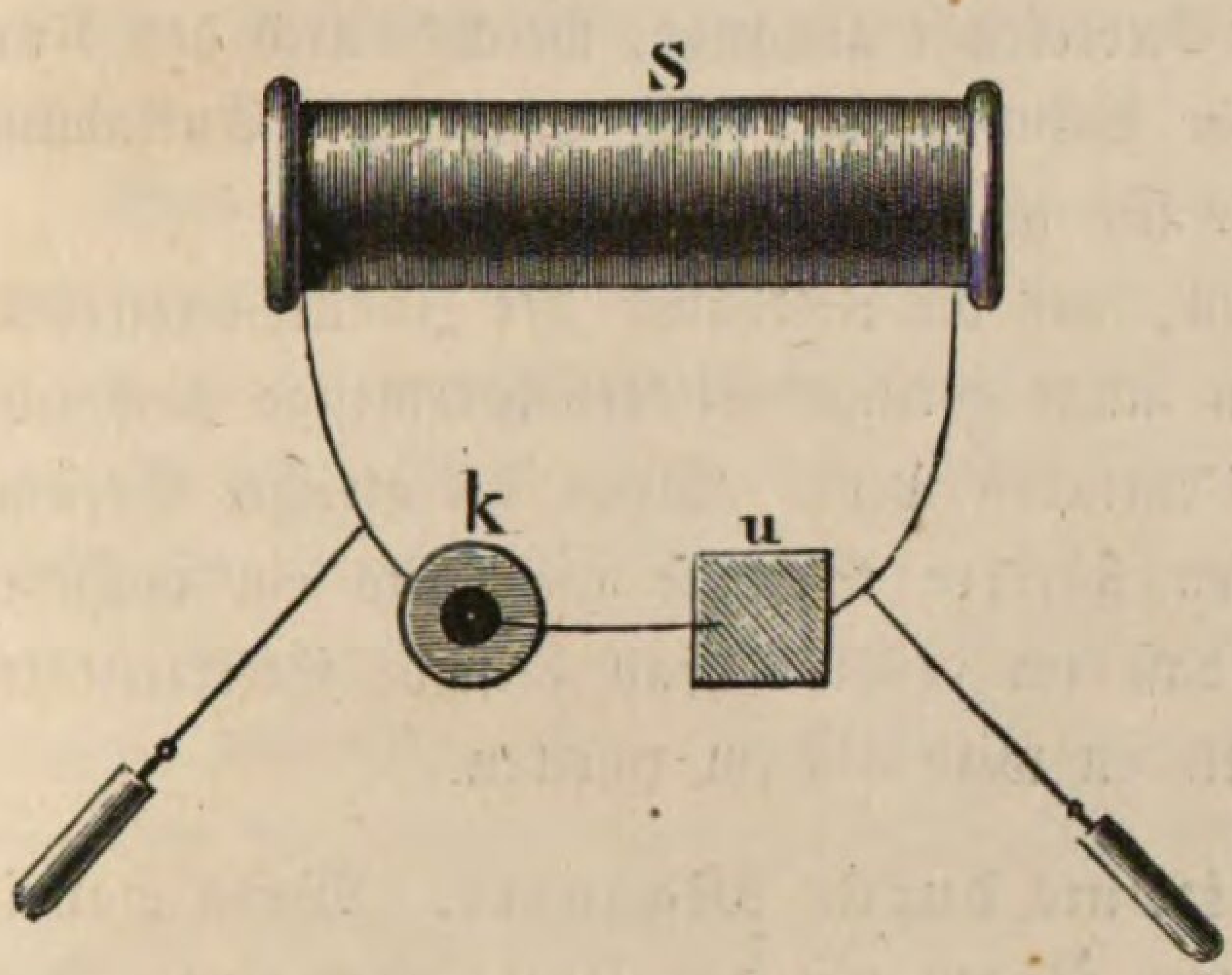
pfeiler, welche die metallene Axe eines messingenen Zahnrades tragen, dessen Zähne am besten so geschnitten sind, wie die Zähne des Steigrades einer gewöhnlichen Pendeluhr. An dem einen Messingpfeiler ist der Kupferdraht *a* befestigt, während ein zweiter Kupferdraht *b* federnd gegen das Rad drückt. Man kann nun leicht diesen Apparat in den Schließungsbogen der Kette einschalten, man braucht nur *b* mit dem einen Ende des Hauptdrahtes, *a* mit dem einen Poldrahte des Elektromotors zu verbinden. So oft nun bei Umdrehung des Rades der federnde Draht *b* von einem Zahne des Rades zum anderen überspringt, erfolgt ein Oeffnen und ein alsbaldiges Wiederschließen der Kette.

Faßt nun eine Person die Handgriffe *h* mit angefeuchteten Häaden, so

empfindet sie eine Reihe rasch auf einander folgender elektrischer Schläge, wenn das Unterbrechungsrad gedreht wird.

Einwirkung der Windungen auf einander. Wenn man eine ein- 214
fache Kette durch einen kurzen Draht schließt, so erhält man nur einen schwachen Funken, wenn man die Kette wieder öffnet; einen Schlag erhält man dabei nicht; wendet man aber statt des kurzen einen sehr langen, spiralförmig aufgewundenen Draht an, so sieht man beim Oeffnen der Kette einen ungleich stärkeren Funken überspringen, und wenn man das eine Drahtende in der einen, das andere in der anderen Hand hält, so fühlt man im Momente des Oeffnens einen Schlag.

Fig. 469.



Um solche Unterbrechungsschläge einer einzigen Spirale in rascher Aufeinanderfolge durch den Körper zu senden, kann man die in Fig. 469 angedeutete Anordnung anwenden. *S* ist die Spirale, *k* der galvanische Becher, *u* ist das Unterbrechungsrad. Die Handhaben sind angebracht, wie die Figur zeigt, so daß während der Unterbrechung des Hauptstromes der die Handhaben fassende Körper den Schließungsbogen der Spirale bildet. Diese Erscheinung erklärt sich folgendermaßen:

Wenn die Nebenspirale fehlt, so wirkt jede Windung der Spirale inducirend auf die benachbarten; beim Schließen der Kette wird also in der stromleitenden Spirale selbst ein Strom inducirt, welcher dem entstehenden Hauptstrome entgegengesetzt ist, und deshalb nicht zur Wirkung kommt. Beim Oeffnen der Kette wird dagegen ein mit dem Hauptstrome gleichgerichteter Strom inducirt, welchen Faraday mit dem Namen Extrastrom bezeichnet hat.

Die Schläge des Extrastromes sowohl, wie die des gewöhnlichen Inductionsstromes werden dadurch bedeutend verstärkt, daß man Eisenstäbe oder noch besser Bündel von Eisendraht in die Höhlung der Spirale einlegt.

Die Stärke der Schläge ist durchaus nicht von der Stromstärke abhängig, wie man dies am leichtesten mit Hülfe eines gewöhnlichen Inductionsapparates mit zwei Spiralen, wie Fig. 467, zeigen kann. Wenn man statt des Unterbrechungsrades bei *n* ein Quecksilbernäpfchen in den Schließungsbogen der Hauptspirale, in den Schließungsbogen der Nebenspirale einen Multiplicator einschaltet, so erhält man einen Ausschlag der Multiplicatornadel, so oft bei *n* der Hauptstrom geschlossen oder unterbrochen wird. Als bei einem derartigen Versuch ein Bündel dünner Eisendrähte in die Höhlung der Hauptspirale eingelegt war, betrug die Ablenkung 45°; wurde das Bündel mit einem massiven Eisencylinder vertauscht, so betrug sie 63°. Obgleich also hier die Stromstärke für den

massiven Eisencylinder bedeutend größer war, so erhielt man für das Drahtbündel ungleich stärkere Schläge.

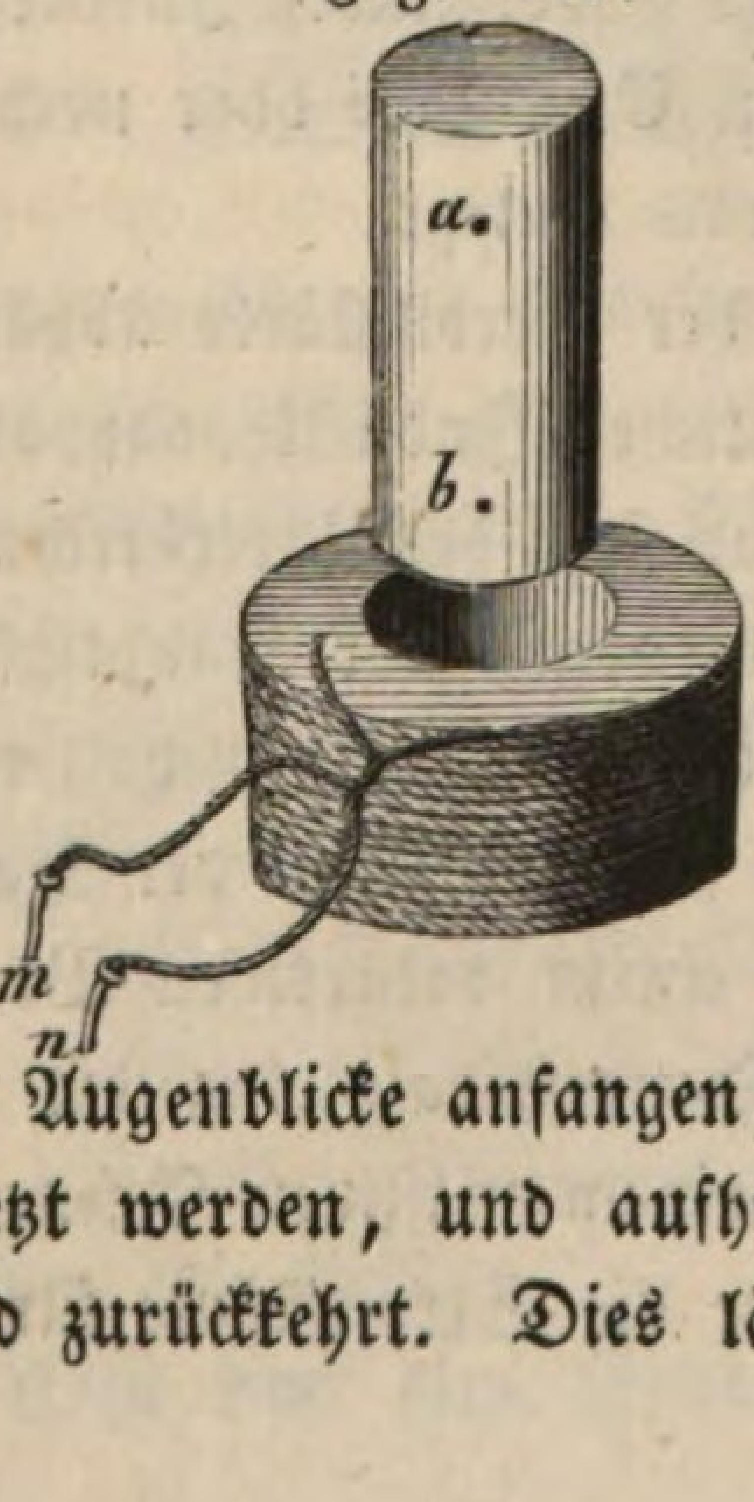
Im Allgemeinen ist die Stromstärke der Inductionsströme eine sehr geringe, wie schon daraus hervorgeht, daß man ja den Multiplicator anwenden muß, um eine Ablenkung der Nadel zu erhalten. Daß dessenungeachtet die Inductionsströme so starke Schläge geben, kann jedoch nicht auffallen, wenn man bedenkt, daß der Entladungsschlag der Leidner Flasche, welcher die Nerven so heftig erschüttert, durch einen Multiplicator geleitet, doch nur eine sehr schwache Wirkung auf die Nadel bewirkt. (Man muß, um dieselbe hervorzubringen, den Entladungsschlag durch Einschaltung einer feuchten Schnur verzögern.) Somit ist klar, daß die Stärke der physiologischen Wirkung überhaupt nicht von der Quantität der Elektricität abhängt, welche durch den Körper hindurch geht, sondern von der Schnelligkeit, mit welcher die Entladung einer gewissen Elektricitätsmenge vor sich geht.

Daraus kann man nun schließen, daß die Zeitdauer der Inductionsströme eine sehr kurze ist, daß eine, wenn auch geringe Elektricitätsmenge doch sehr schnell durch den Körper hindurch entladen wird. Wenn bei gleicher Stromstärke ein Bündel von Eisendrähten stärkere Schläge giebt als ein massiver Eisenstab, so muß man schließen, daß im ersteren Fall dieselbe Elektricitätsmenge rascher durch den Körper entladen wird als im zweiten.

215 **Induction elektrischer Ströme durch Magnete.** Wenn man in die Höhlung einer Drahtspirale, deren Enden mit den Drahtenden eines Multiplicators verbunden sind, einen Magnetstab einschiebt, so wird die Nadel abgelenkt, um nach einigen Schwingungen wieder auf dem Nullpunkt zurückzukehren, wenn man den Magneten ruhig in der Spirale läßt; sobald man ihn zurückzieht, erfolgt ein Ausschlag nach der entgegengesetzten Seite.

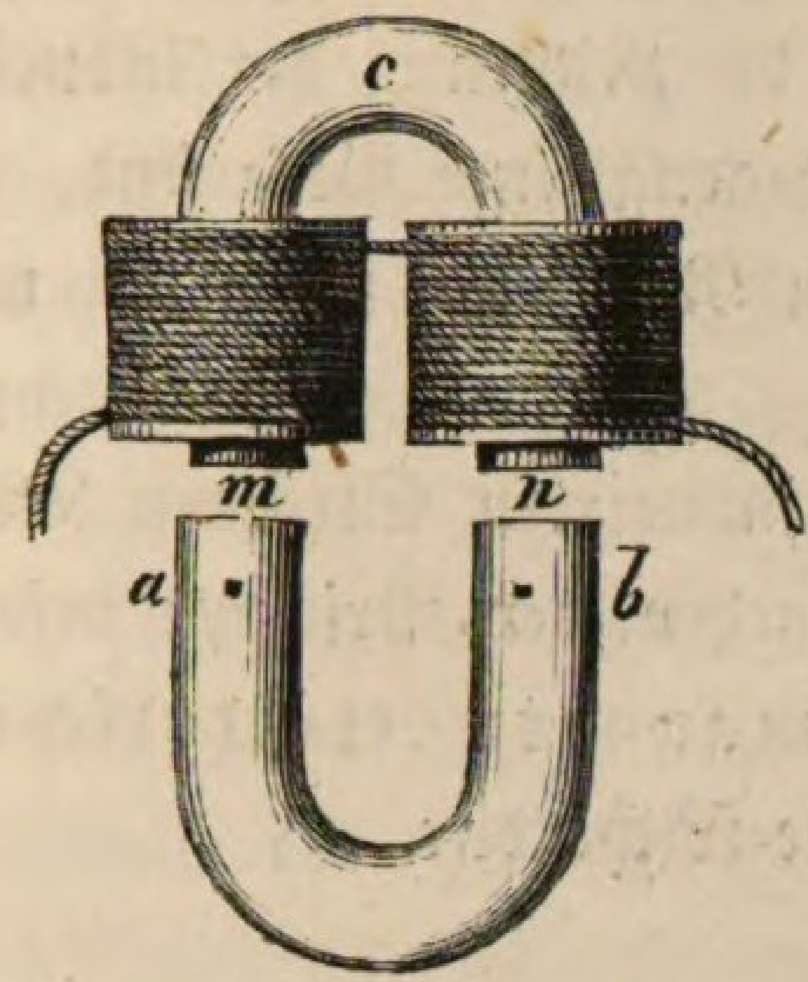
Es versteht sich von selbst, daß der Multiplicator hinlänglich weit entfernt ist, um nicht direct durch die Bewegung des Magnetstabes afficirt zu werden. Die Richtung des Stromes, Fig. 470, welche das Galvanometer bei der Annäherung des Magneten anzeigt, ist der Richtung der Ströme entgegengesetzt, welche nach der Ampère'schen Theorie den Magneten umkreisen; der bei der Entfernung des Magneten im Drahte inducirte Strom hat mit jenen Strömen gleiche Richtung.

Fig. 470.



Bei diesem Versuche wird eine Wirkung auf die geschlossenen Drahtwindungen durch die Annäherung oder die Entfernung des Magneten hervorgebracht; die magnetische Wirkung kann aber auch noch auf eine andere Weise anfangen und aufhören; sie kann in dem Augenblicke anfangen, in welchem die magnetischen Flüssigkeiten im Eisen zersetzt werden, und aufhören, wenn es wieder in den nichtmagnetischen Zustand zurückkehrt. Dies läßt sich auf folgende Weise zeigen.

Fig. 471.



In Fig. 471 ist *ab* ein starker Hufeisenmagnet, *mcn* ist ein Stück weiches Eisen, welches ebenfalls hufeisenförmig gebogen ist, und dessen Schenkel mit vielfachen Windungen eines und desselben sehr langen, mit Seide übersponnenen Drahtes bedeckt sind. Die Richtung der Windungen auf beiden Schenkeln muß von der Art seyn, daß, wenn ein Strom durch den Draht ginge, die beiden Schenkel entgegengesetzte Pole bildeten; werden nun die freien Drahtenden der Spirale in leitende Verbindung gebracht, so werden in ihnen Ströme von abwechselnd entgegengesetzter Richtung inducirt, wenn man den Magneten abwechselnd nähert und entfernt.

Selbst durch den Erdmagnetismus können Ströme inducirt werden. Wenn man einen Stab von weichem Eisen, der mit einem Schraubendrahte umwunden ist, in die Richtung der Inclinationsnadel hält, dann aber rasch umdreht, so daß das obere Ende unten, das untere oben hin kommt, so wird in dem Schraubendrahte ein Strom inducirt.

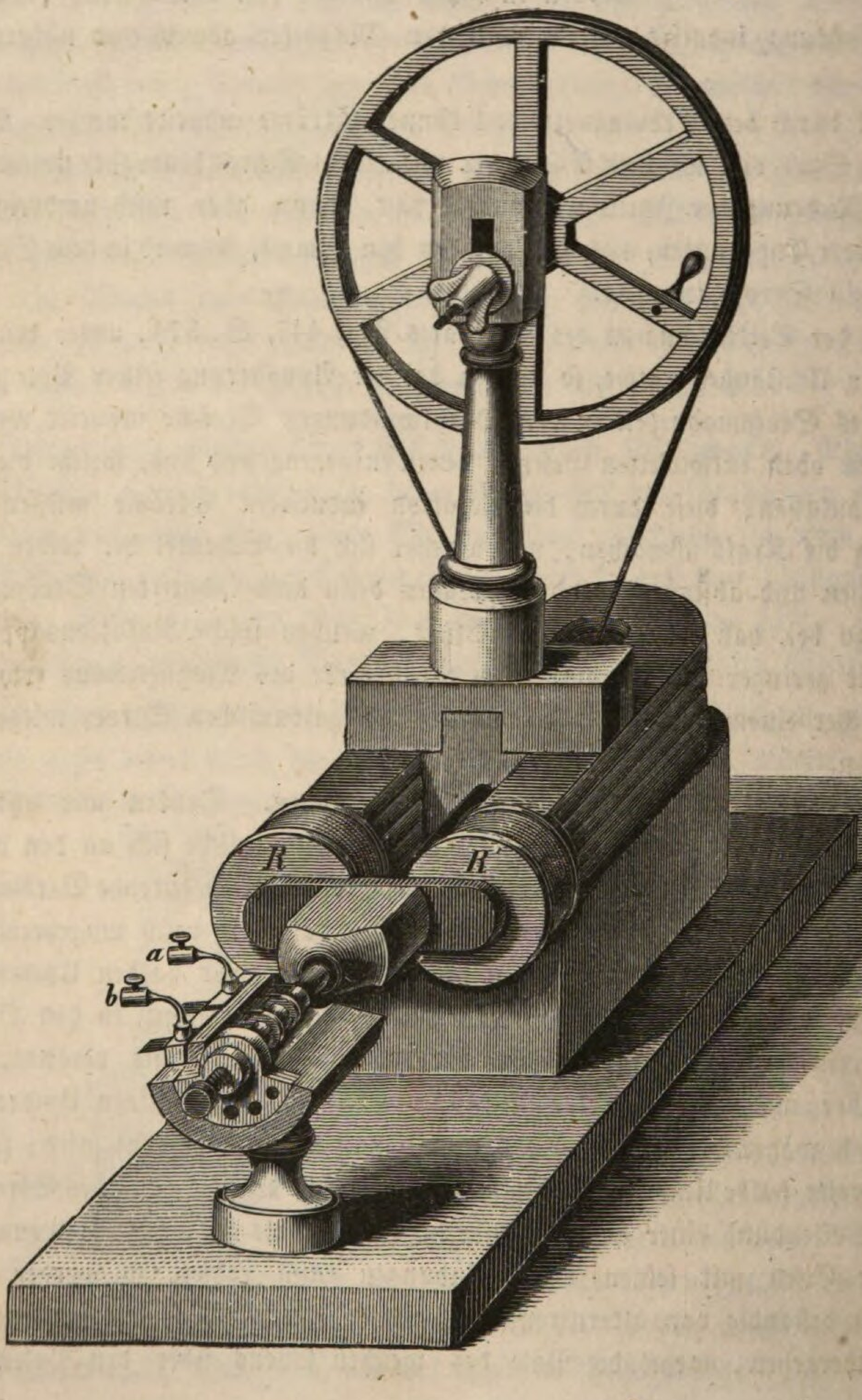
Wenn der Elektromagnet des Apparates Fig. 447, S. 374, unter den dort angegebenen Umständen rotirt, so müssen bei der Annäherung seiner Pole gegen die Pole des Stahlmagneten in den Drahtwindungen Ströme inducirt werden, die nach den oben entwickelten Gesetzen denen entgegengesetzt sind, welche die Rotation veranlassen; diese durch die Rotation inducirten Ströme müssen also nothwendig die Kraft schwächen, mit welcher sich die Schenkel der beiden Hufeisen anziehen und abstoßen; und so tragen denn diese inducirten Ströme wesentlich dazu bei, daß der mechanische Effect, welchen solche Rotationsapparate liefern, weit geringer ist, als man nach der Stärke des Magnetismus erwarten sollte, welcher einem weichen Eisen durch einen galvanischen Strom mitgetheilt werden kann.

Magneto-elektrische Rotationsmaschine. Denken wir uns die 216
Enden der in Fig. 471 betrachteten Inductionsspiralen, welche sich an den beiden Polen eines hufeisenförmigen weichen Eisenkerns befinden, in leitende Verbindung gebracht, dann dieses weiche Eisen um eine vertikale Axe rasch umgedreht, so daß der Pol *m*, der sich eben über *a* befindet, nach einer halben Umdrehung über *b* steht, so wird, weil *m* sich von *a* und *n* von *b* entfernt, in den Drahtwindungen ein Strom inducirt; dieser Strom nun dauert mit veränderlicher Stärke, aber mit unveränderter Richtung während einer halben Umdrehung fort, nämlich während *m* von *a* bis *b* und *n* von *b* bis *a* gedreht wird; sobald aber die zweite halbe Umdrehung beginnt, ändert sich die Richtung des Stromes, um nach Vollendung einer ganzen Umdrehung abermals zu wechseln; wenn also das weiche Eisen mit seinen Drahtwindungen rasch rotirt, so werden diese Windungen beständig von alternirenden Strömen durchlaufen, die jedesmal in einander übergehen, wenn die Pole des weichen Eisens über den Polen des

Magneten stehen. Daß die Richtung der Ströme wirklich in der oben angegebenen Weise wechselt, ergiebt sich leicht aus den über die Richtung der inducirten Ströme gegebenen Regeln; denn da *a* und *b* entgegengesetzte Pole sind, so muß das Entfernen von *a* einen Strom in derselben Richtung induciren wie in Annähern gegen den Pol *b*.

Um auf bequeme Weise mit den durch Magnete inducirten Strömen Versuche anstellen zu können, hat man nach dem eben angedeuteten Principe besondere Maschinen construirt, welche den Namen der magneto-elektrischen Rotationsmaschinen führen. Fig. 472 stellt eine solche dar.

Fig. 472.



Der aus mehreren Lamellen zusammengesetzte Hufeisenmagnet liegt wagerecht. In der Mitte zwischen den beiden Schenkeln desselben ist die Rotationsaxe angebracht, um welche sich die Inductionsspiralen drehen. Die Umdrehung dieser Axe wird durch einen Schnurlauf bewirkt, welcher von einer größeren oberhalb befindlichen Drehscheibe über eine kleinere auf der Axe sitzende Rolle geht.

Die beiden Enden dieser eisernen Umdrehungsaxe laufen in Spitzen. Auf der vorderen Hälfte derselben ist eine eiserne Platte befestigt, welche, gegen die Magnetpole gekehrt, zwei Cylinder von weichem Eisen trägt, auf denen die Inductionsspiralen *R* aufgesteckt sind.

Es kommt nun darauf an, während der Rotation der Spiralen zwischen den freien Drahtenden derselben stets denjenigen Körper eingeschaltet zu erhalten, durch welchen man die Inductionsströme hindurchsenden will; dies wird nun durch eine Vorrichtung vermittelt, welche man den Commutator nennt und welche an dem vorderen Theile der Rotationsaxe befestigt ist.

Der an den Stöhrer'schen Maschinen angebrachte Commutator hat folgende Einrichtung. An beiden Enden des Messingrohrs *m*, Fig. 473 und Fig. 474,

Fig. 473.

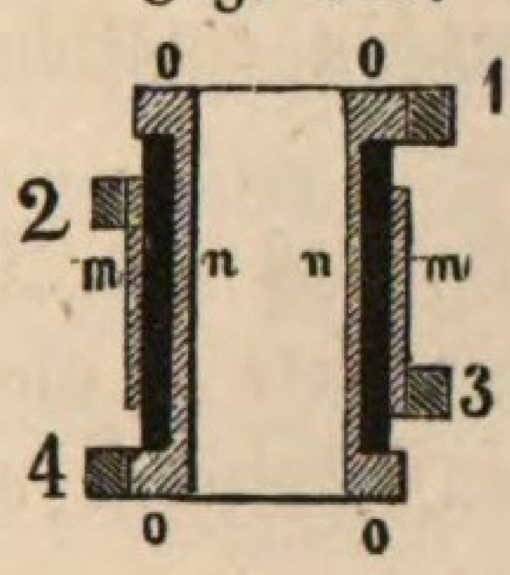
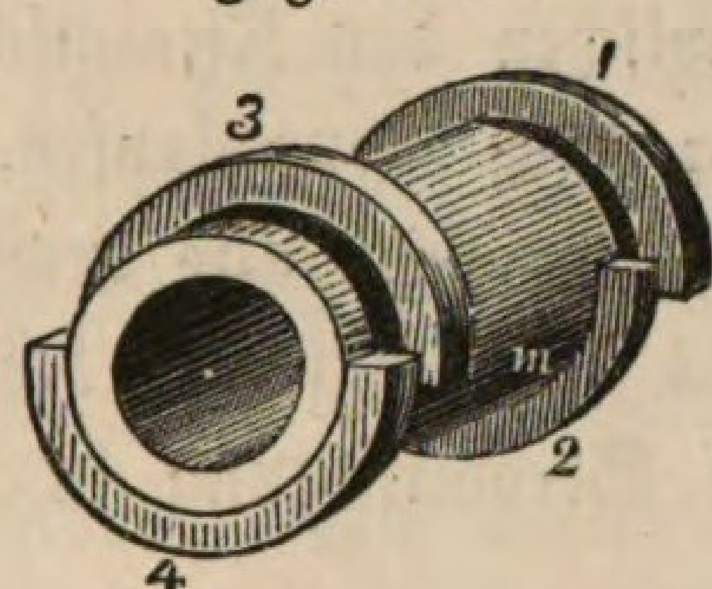


Fig. 474.



sind zwei Stahlkämme 2 und 3 so aufgelöthet, daß sie sich genau gegenüberliegen und die Enden derselben sich etwas überragen. Innerhalb des Rohres *m*, von demselben durch ein dünnes Buchsbaumrohr getrennt, ist ein zweites Messingrohr *n*, welches an beiden Enden etwas vorragt. Die Vorsprünge tragen zwei mit dem Rohre *n* aus einem Stück gedrehte Ringe *o* von gleichem Durchmesser mit der Höhlung des Rohres *m*; auf diese Ringe sind die Stahlkämme 1 und 4 den Stahlkämmen 3 und 2 correspondirend aufgelöthet, wie man dies am deutlichsten in Fig. 474 sieht.

Dieses ganze System ist auf der Umdrehungsaxe befestigt.

Das eine Drahtende *k* der Spiralen führt zum Kamm 1, das andere Drahtende *h* führt zum Kamm 2.

Zwei flache dünne Stahlfedern sind an dem Gestelle der Maschine so angebracht, daß ihre vorderen geschlitzten Enden die Stahlkämme von oben leicht berühren; sie können nach Belieben mittelst einer Schraube mehr oder weniger gespannt werden.

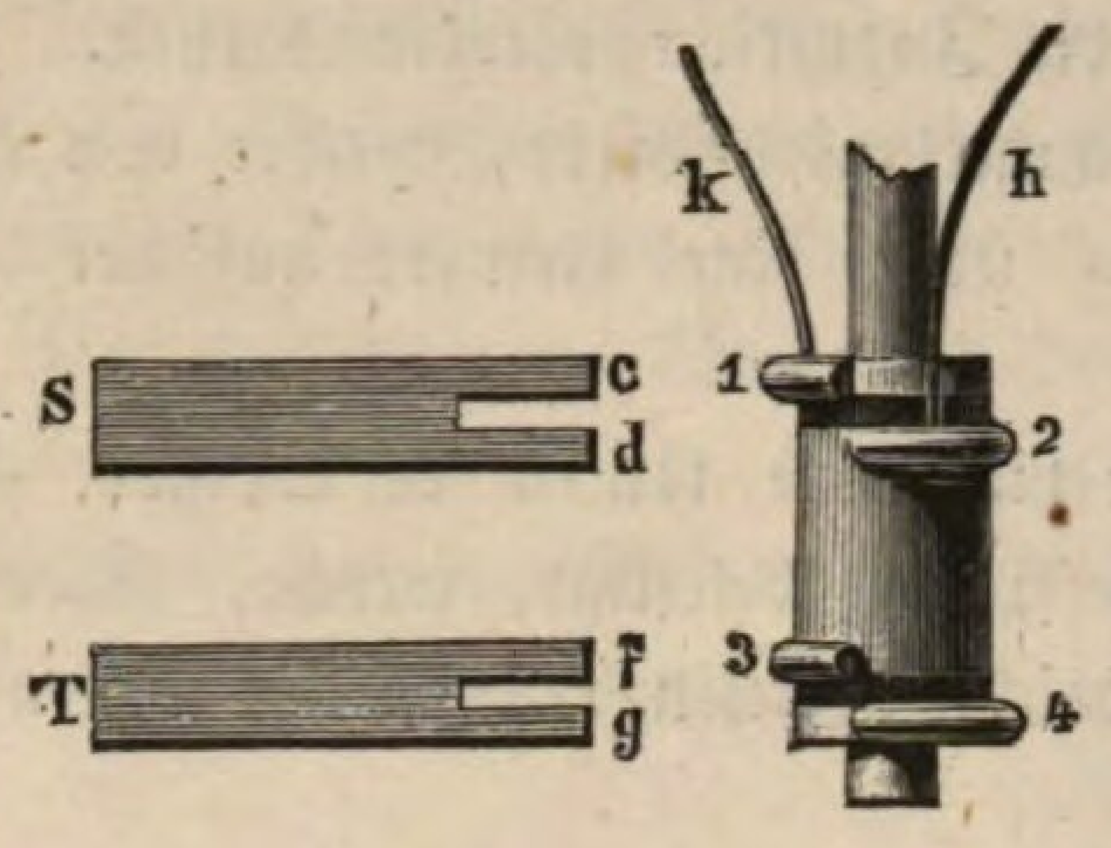
Der leichteren Uebersicht wegen sind in Fig. 475 (s. f. S.) die beiden Federn etwas von der Walze abgerückt gezeichnet. Die Feder *S* theilt sich in die Gabeln *c* und *d*; die Feder *T* theilt sich in die Federn *f* und *g*.

Mit der Feder *S* ist die Klemmschraube *a*, Fig. 472, mit *T* ist *b* in leitender Verbindung. Zwischen *a* und *b* werden die Körper eingeschaltet, durch welche man die Inductionsströme hindurchsenden will.

In der Stellung, welche Fig. 475 entspricht, schleift *d* auf 2, *g* auf 4,

während *c* und *f* frei sind. Wenn nun aber 2 von *h* die positive Elektricität aufnimmt, während 4 mit dem negativen Drahtende *k* in leitender Verbindung steht, so circulirt der positive Strom in folgender Weise durch den Apparat: Von *h* geht er durch den Kamm 2 und die Gabel *d* zur Klemmschraube *a*, von dieser durch den eingeschalteten Leiter nach *b*, um über *g* und den Kamm 4 zum negativen Drahtende *k* der Spiralen zu gelangen.

Fig. 475.



Dreht sich nun die Axe für einen vorn stehenden Beschauer wie der Zeiger einer Uhr, so wird alsbald der Kamm 2 die Gabel *d* und der Kamm 4 die Gabel *g* verlassen, während *c* auf 1 und *f* auf 3 zu liegen kommt; der Commutator ist nun so gestellt, daß dieser Wechsel gleichzeitig mit dem Wechsel der Stromrichtung in den Spiralen stattfindet, so daß also in diesem Moment *k* das positive und *h* das negative Drahtende der Spiralen wird; es geht also der positive Strom jetzt von *k* auf 1, von da durch *c* nach *a* u. s. w.; es wird also auch jetzt der positive Strom den zwischen den Klemmschrauben eingeschalteten Körper noch in der Richtung von *a* nach *b* durchlaufen.

Durch den Stöhrer'schen Commutator wird also bewirkt, daß der Inductionsstrom durch den zwischen *a* und *b* eingeschalteten Körper stets in gleicher Richtung hindurchgeht, obgleich die Stromrichtung in den Spiralen mit jeder halben Umdrehung sich ändert.

Während der Rotation der Spiralen nehmen die in ihnen inducirten Ströme allmälig ab und zu; langsam wachsende Ströme bringen aber keine starke physiologische Wirkung, wohl aber alle andere Wirkungen des galvanischen Stromes hervor.

Schraubt man in die Klemmschrauben *a* und *b* die Drahtendeu eines Elektromagneten ein, so wird dieser durch die Inductionsströme erregt; die Nadel einer zwischen *a* und *b* eingeschalteten Tangentenbussole zeigt, da die Ströme stets in gleicher Richtung dieselbe durchlaufen, bei einigermaßen schneller Drehung eine constante Ablenkung. In einem zwischen *a* und *b* eingeschalteten Voltameter findet Wasserzersetzung Statt, und zwar wird das Sauerstoffgas stets an der einen, das Wasserstoffgas stets an der anderen Platte ausgeschieden. Der Strom einer magneto-elektrischen Rotationsmaschine kann, wenn derselbe kräftig genug ist, einen dünnen Metalldraht glühend machen u. s. w.

Will man mit dem Rotationsapparat physiologische Schläge hervorbringen, so muß für eine momentane Unterbrechung des Hauptstromes gesorgt seyn. Dies geschieht beim Stöhrer'schen Commutator dadurch, daß die Kämme etwas übereinandergreifen, wie dies in Fig. 474 etwas übertrieben gezeichnet ist. Dadurch wird bewirkt, daß bei jeder halben Umdrehung einmal auf ganz kurze Zeit alle 4 Kämme des Commutators an den Federn schleifen, so daß

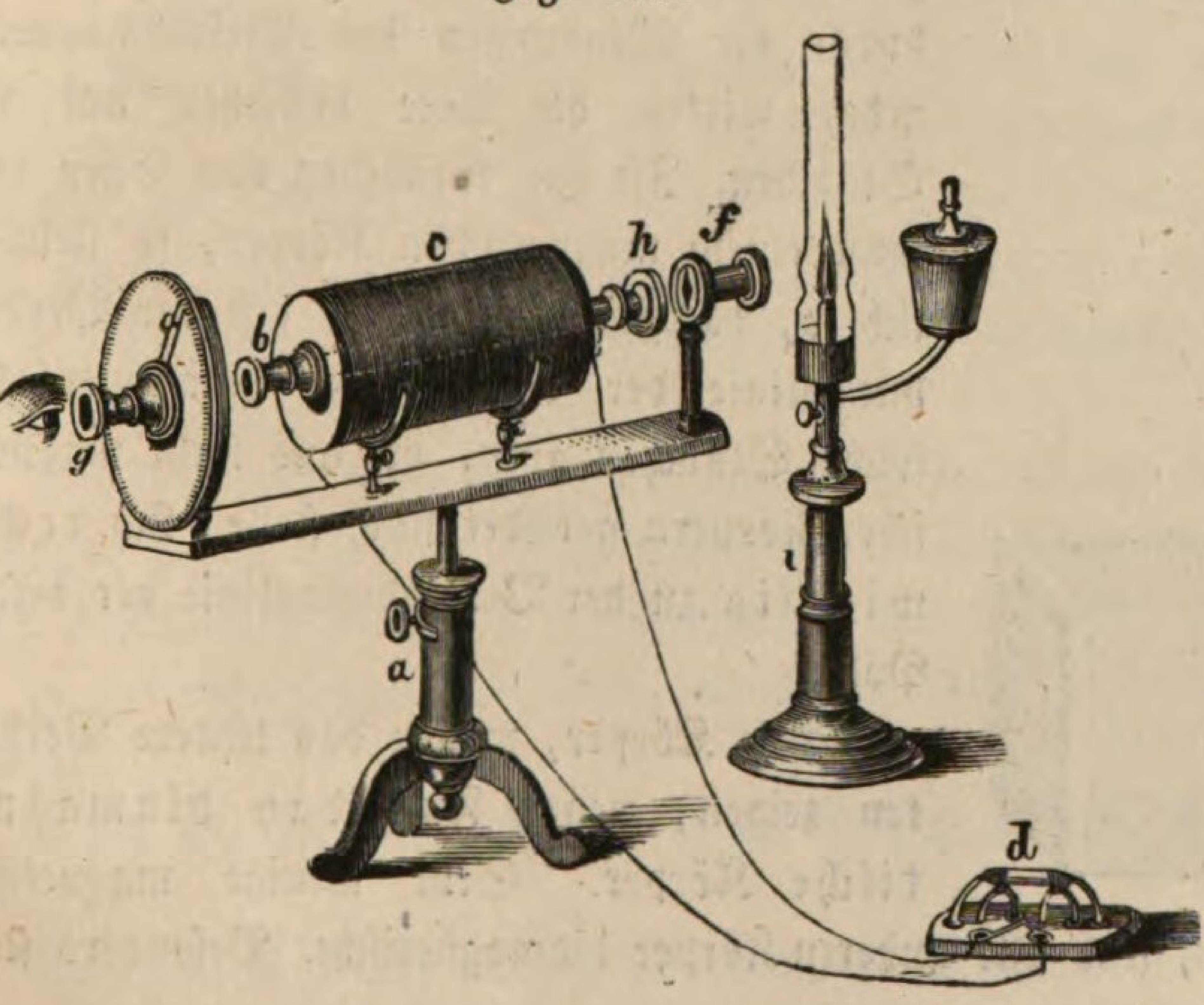
für diese Zeit der Strom direct durch die Federn geschlossen ist und kein Strom durch den Schließungsbogen geht, welcher zwischen den Klemmschrauben *a* und *b* eingeschaltet ist. Dieser also im Apparat selbst zurückkehrende Strom ist ziemlich stark, weil er außer dem Leitungswiderstand in den Spiralen keinen Leitungswiderstand im Schließungsbogen zu überwinden hat, und in dem Augenblicke, wo nun zwei Kämme ihre Federn verlassen, wo also dieser directe Strom unterbrochen wird, entsteht in Folge dieser Stromunterbrechung in den Spiralen ein Extrastrom, welcher in dem zwischen *a* und *b* mittelst Handgriffen eingeschalteten menschlichen Körper einen heftigen Schlag hervorbringt. Diesen Schlag erhält also der Körper zweimal bei jeder Umdrehung der Rotationsaxe.

Die Unterbrechung des im Apparat selbst zurückkehrenden Stromes giebt sich auch durch einen kräftigen an der Unterbrechungsstelle auftretenden Funken zu erkennen.

Diamagnetismus. Nachdem Faraday die Erscheinungen der Inductionsströme entdeckt hatte, gelangte er zu der Ansicht, daß der Hauptdraht auf den Nebendraht eine beständige Wirkung ausüben müsse, daß der Schließungsschlag nur den Uebergang des Drahtes in einen neuen hypothetischen Zustand, der Oeffnungsschlag aber die Rückkehr aus demselben fühlbar mache. Diesen hypothetischen Zustand nannte er den elektrotonischen Zustand; ein solcher Zustand sollte nun nach seiner Ansicht in jedem Körper hervorgerufen werden, der sich in der Nähe einer durchströmten Spirale oder eines Magneten befinde. Nach vielen vergeblichen Versuchen gelang es ihm endlich, eine Reihe hierher gehöriger Erscheinungen aufzufinden. 217

Führt man einen elektrischen Strom in vielfachen Windungen um eine durchsichtige Flüssigkeit herum, so wird derselben durch diesen Strom ein eigenthümliches Verhalten gegen polarisirte Lichtstrahlen mitgetheilt. Fig. 476 stellt einen Apparat dar, mit welchem man die eben erwähnte Erscheinung beobachten kann; *g* und *f* sind zwei Nichol'sche Prismen, Kalkspathprismen, welche nur ein polarisirtes Bild geben, also die beiden Spiegel des Polarisations-Apparates vertreten. *b h* ist eine an beiden Enden mit Glasplatten verschlossene Röhre, die mit der zu un-

Fig. 476.



tersuchenden Flüssigkeit gefüllt ist; sie steckt in einer Magnetisirungsspirale. Man sieht durch die beiden Nichol'schen Prismen und die mit der Flüssigkeit gefüllte Röhre nach den Flammen einer Argand'schen Lampe. Das Ocularprisma *g* wird so gedreht, daß das Gesichtsfeld dunkel ist; läßt man nun einen kräftigen galvanischen Strom durch die Spirale gehen, so erscheint alsbald die Flamme wieder, und man muß *g* nach der rechten oder linken Seite drehen, um sie wieder verschwinden zu machen.

Die Polarisationsebene des Strahls wird nach derselben Richtung gedreht, nach welcher der positive Strom in der Spirale circulirt.

Man muß schon sehr starke Ströme anwenden und die Spirale muß viele Windungen haben, wenn man diese Erscheinung recht deutlich machen will.

Der galvanische Strom, oder ein Elektromagnet, bringt also auch auf nicht magnetische Körper eine continuirliche Wirkung hervor, die zuerst auf optischem Wege nachgewiesen wurde; diese Einwirkung muß aber auch auf undurchsichtige Körper stattfinden, sie muß also auch noch andere als optische Erscheinungen hervorbringen können.

Fig. 477.

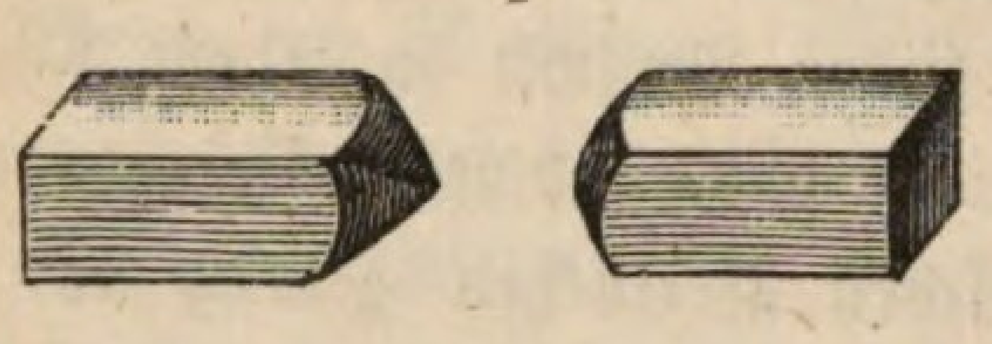
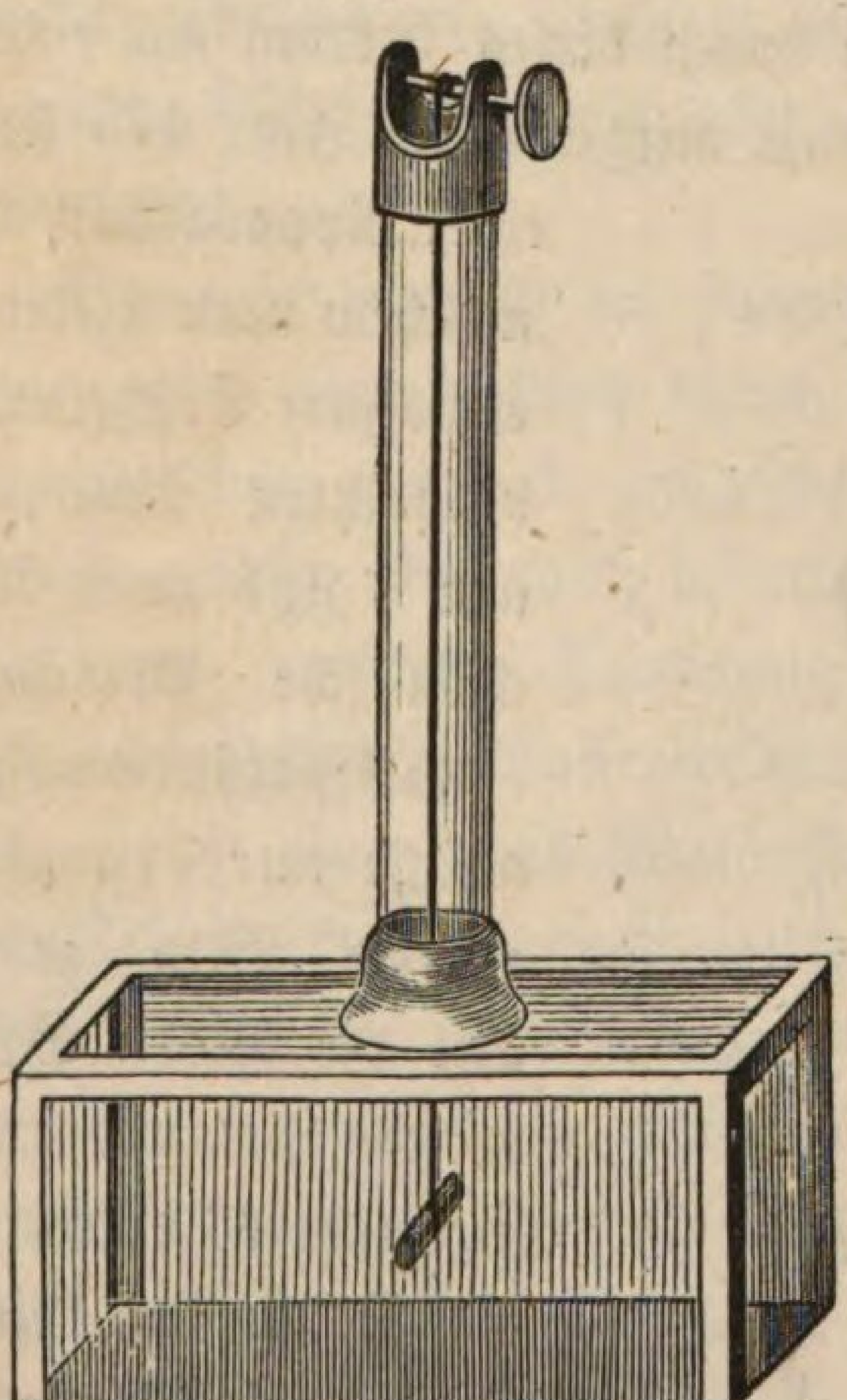


Fig. 478.



Um diese Wirkung zu zeigen, wird auf jedem Pol des Elektromagneten Fig. 445 ein weiches Eisen von der Form Fig. 477 aufgesetzt, so daß die Spitzen derselben einander zugekehrt sind. Auf das Tischlein *t* setzt man den Glaskasten, Fig. 478, welcher in der Mitte eine Glasröhre trägt, in welcher ein Coconfaden herabhängt, der ein Stäbchen des zu untersuchenden Körpers trägt. Man richtet den Faden so, daß das Stäbchen genau in die Mitte der beiden Pole zu hängen kommt. Sobald nun der Strom durch die Windungen des Elektromagneten geht, wirken die Pole desselben auf das Stäbchen. Ist das Stäbchen von Eisen oder sonst einem magnetischen Körper, so stellt es sich so, daß seine Längenaxe mit der Verbindungslinie der beiden Pole zusammenfällt; solche Stäbchen aber, die aus nicht magnetischen Körpern gebildet sind, stellen sich rechtwinklig zu der Verbindungslinie der beiden Pole.

Alle Körper, welche das letztere Verhalten zeigen, nennt Faraday diamagnetische Körper. Sehr wenige magnetische Metalle ausgenommen, sind alle anderen Körper diamagnetische. Besonders stark diamagnetisch ist Wismuth.

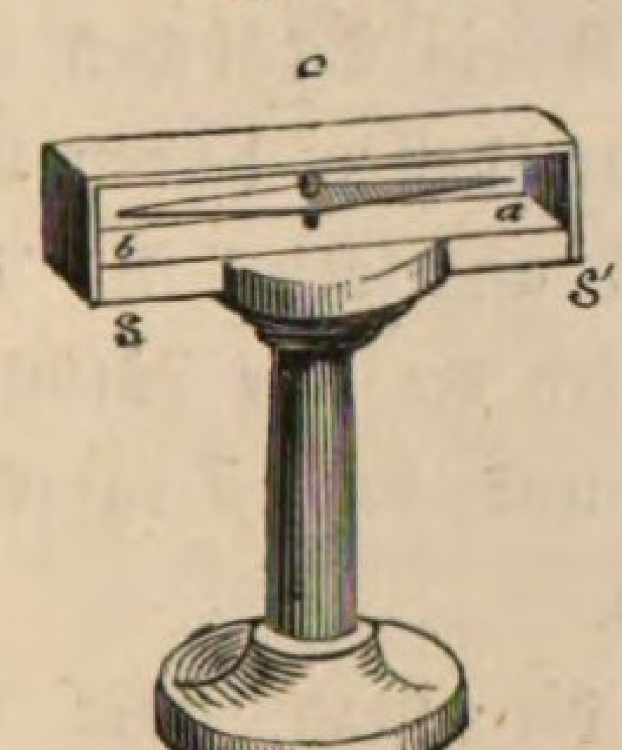
Die quere Stellung der magnetischen Körper zwischen den Polen des Elektromagneten ist die Folge einer Abstoßung, welche die Magnetpole auf sie äußern. Diese Abstoßung zeigt sich am besten auf folgende Weise: Man stelle die Pole Fig. 477 ganz nahe zusammen, und hänge an den Faden nun ein Wismuthkügelchen, welches man so richtet, daß es gerade zwischen den beiden Polspitzen hängt. Sobald man die Kette schließt, wird das Kügelchen aus seiner Ruhelage getrieben und etwas auf die Seite gestoßen.

Fünfte Abtheilung.

Thermoelektrische Ströme und thierische Elektricität.

Wenn zwei Metallstäbe so zusammengelöthet sind, daß sie eine geschlossene 218
Kette von beliebiger Form bilden, so entsteht ein mehr oder minder starker Strom, so oft die beiden Löthstellen verschiedene Temperatur haben, und der Strom dauert so lange fort, als der Temperaturunterschied unterhalten wird.

Fig. 479.



Es läßt sich dies für einen speciellen Fall mit dem Apparate Fig. 479 nachweisen. *s s'* ist ein Stäbchen von Wismuth, *s c s'* ein Streifen von Kupfer, welcher an die Enden des Wismuthstäbchens angelöthet ist; *a b* ist eine auf einer Spitze frei spielende Magnetnadel. Wenn die beiden Löthstellen noch die Temperatur der umgebenden Luft haben, wird der Apparat so gestellt, daß die Ebene des Vierecks *s c s'* in die Ebene des magnetischen Meridians fällt, daß also die Nadel mit der Axe und den Längenkanten des Wismuthstäbchens parallel steht; sobald nun eine der Löthstellen, etwa *s*, erwärmt wird, erleidet die Nadel eine mehr oder weniger bedeutende Ablenkung; erkaltet man aber dieselbe Löthstelle *s* unter die Temperatur der umgebenden Luft, so beobachtet man eine Ablenkung nach entgegengesetzter Richtung.

Diese Ablenkungen der Nadel bald nach der einen, bald nach der anderen Richtung zeigen offenbar einen elektrischen Strom an, welcher den Apparat in einer bestimmten Richtung durchkreist, wenn die Löthstelle *s* wärmer ist als *s'*; in der entgegengesetzten aber, wenn die Löthstelle *s* kälter ist als die Löthstelle *s'*.

Nicht alle Metalle geben so in die Augen fallende Resultate, wie Wismuth und Kupfer.

Es ist nicht gerade nöthig, daß man einen besonderen Apparat der Art hat, um den thermoelektrischen Fundamentalversuch zu machen; man kann dazu jede

gehörig leicht bewegliche Compaßnadel, etwa die Fig. 480 abgebildete, anwenden. Als thermoelektrisches Element wendet man gewöhnlich ein längliches Rechteck, Fig. 481, an, welches aus Wismuth und Antimon zusammengesetzt ist; in der Figur bezeichnet die hellschattirte Hälfte Wismuth, die andere Antimon. Diese beiden Metalle sind bei *s* und *s'* zusammengelöthet. Um den Versuch zu machen, erwärmt man vorsichtig die eine Löthstelle über einer kleinen Weingeistlampe und hält dann die eine der längeren Seiten des Rechtecks gerade über die sich noch in ihrer gewöhnlichen Lage befindende Magnetnadel. Es ist hier noch zu bemerken, daß Fig. 481 in einem kleineren Maßstabe gezeichnet ist als Fig. 480; man muß das Rechteck aus Wismuth und Antimon, doch so groß machen, daß jede der längeren Seiten wenigstens die Länge der Magnetnadel hat.

Fig. 480.

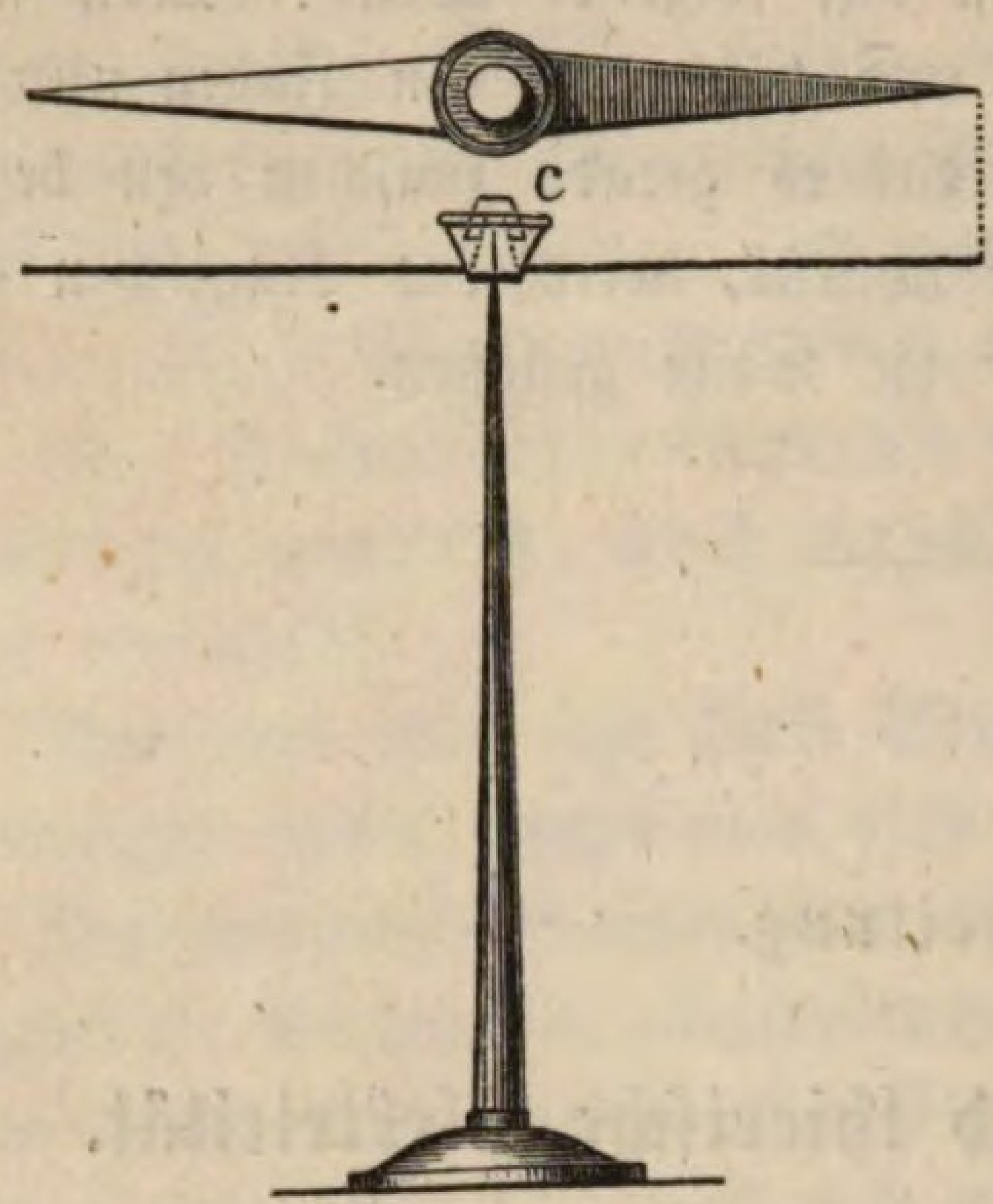
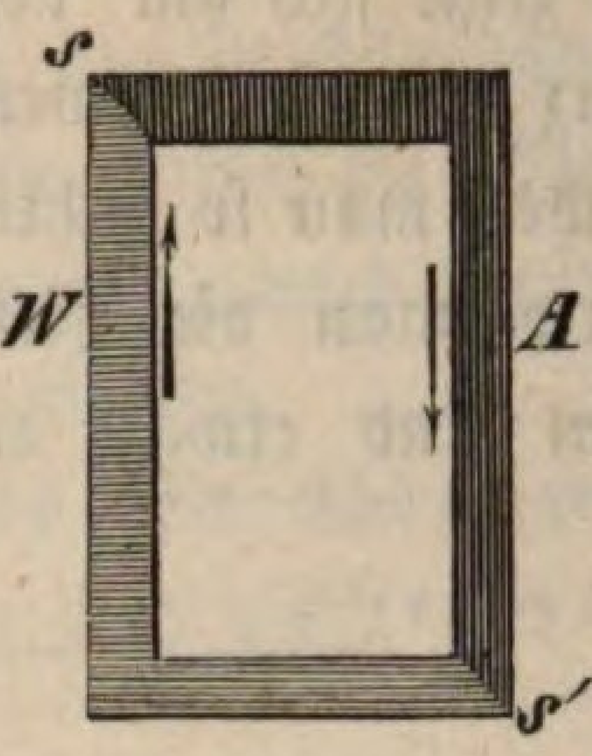
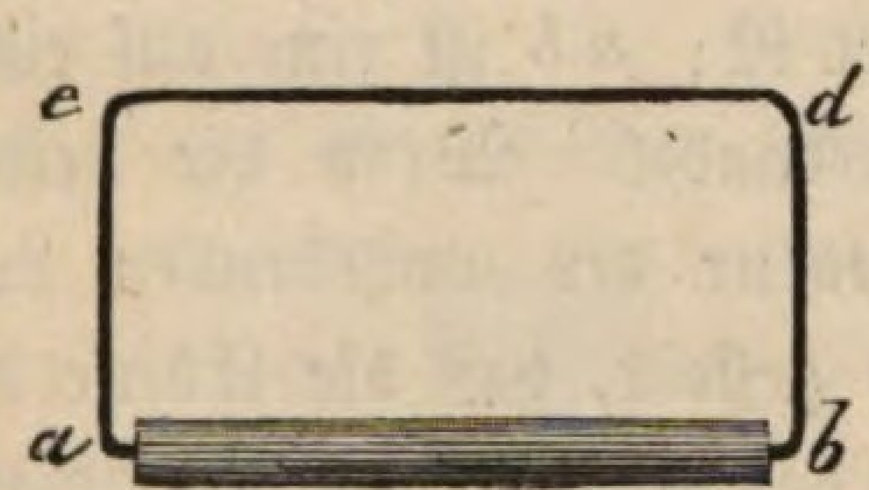


Fig. 481.



Häufig haben die einfachen thermoelektrischen Ketten auch die Fig. 482 dargestellte Einrichtung. *a b* ist ein Stäbchen von Antimon oder Wismuth, an dessen beiden Enden ein Kupferdraht *a e d b* angelöthet ist. Um den Versuch zu machen, wird die eine Löthstelle bei *a* oder bei *b* erwärmt und das Drahtstück *e d* über die Nadel gehalten.

Fig. 482.



Die Untersuchungen, die man über das gegenseitige Verhalten verschiedener Metalle in Beziehung auf die Erregung thermoelektrischer Ströme gemacht hat, haben gezeigt, daß sich die Metalle in eine Reihe zusammenfassen lassen, welche die Eigenschaft hat, daß, wenn man aus je zwei Metallen dieser Reihe eine Kette bildet und an der einen Berührungsstelle erwärmt, an dieser erwärmten Löthstelle der positive Strom von dem in der Reihe tiefer stehenden Metalle zu dem höher stehenden übergeht.

Antimon	Zinn
Arsenik	Silber
Eisen	Mangan
Zink	Kobalt
Gold	Palladium
Kupfer	Platin
Messing	Nickel
Rhodium	Quecksilber
Blei	Wismuth.

In dem Apparate Fig. 479 geht also, wenn die Löthstelle bei *s* erwärmt ist, der Strom in der Richtung von *s* über *c* nach *s'* und dann nach *s* zurück; an der erwärmten Berührungsstelle *s* ist also das in der Reihe höher stehende Kupfer positiv gegen das tiefer stehende Wismuth. In dem Rechteck Fig. 481 circulirt der positive Strom in der Richtung der Pfeile, wenn die Löthstelle bei *s* wärmer ist.

Thermoelektrische Säulen. So wie man mehrere Volta'sche Ele- 219
mente, so kann man auch mehrere thermoelektrische Elemente zu einer thermoelektrischen Säule vereinigen, welche einen Strom geben, wenn man die Löthungsstellen 1, 3, 5 u. s. w. erwärmt, während die dazwischenliegenden kalt bleiben.

Solche thermoelektrischen Säulen können dazu dienen, um in Verbindung mit Multiplicatoren die geringsten Temperaturdifferenzen sichtbar zu machen. Unter allen zu diesem Zwecke construirten Säulen ist unstreitig die von Nobili angegebene die sinnreichste und empfindlichste; sie ist Fig. 483 dargestellt. Sie ist aus 25 bis 30 Stäbchen von Wismuth und Antimon zusammengesetzt, welche ungefähr 4 bis 5 Centimeter lang sind. Sie sind zusammengelöthet, wie man Fig. 484 sieht, nämlich so, daß alle paarigen Löthstellen auf der einen, alle unpaarigen auf der anderen Seite sich befinden. Das Ganze bildet einen kleinen compacten und festen Bündel, wegen der isolirenden Substanzen, mit denen die Zwischenräume zwischen den einzelnen Stäbchen ausgefüllt sind; denn diese dürfen sich natürlich nur an den Löthstellen berühren. Das eine der beiden Halbelemente endlich, mit denen die Kette endigt, ist mit dem Stifte *x*, das andere mit dem Stifte *y* in Verbindung, und diese Stifte bilden auf diese Weise die beiden Pole der Säule, und mit ihnen werden die Enden des Multiplicatordrahtes in Verbindung gebracht.

Fig. 483.

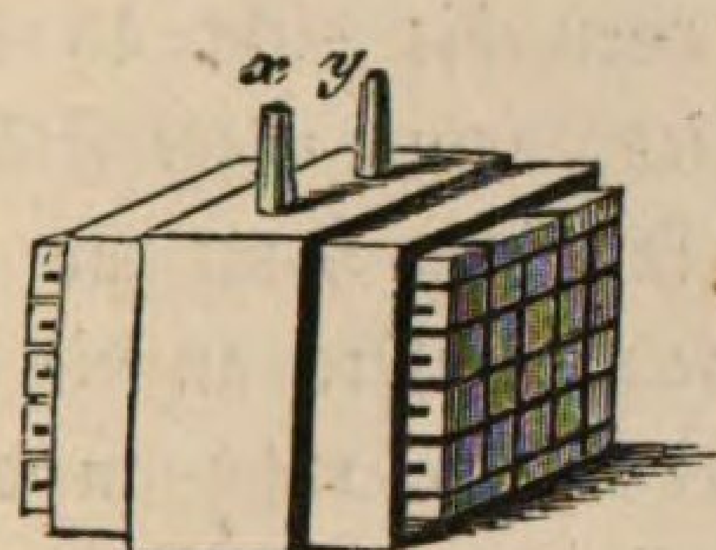
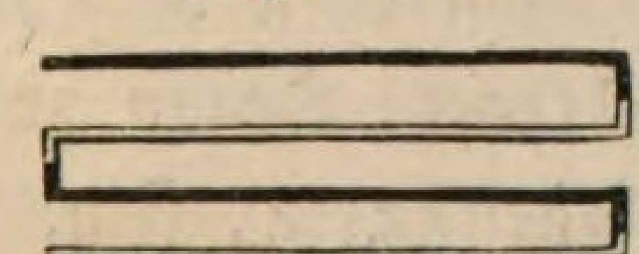


Fig. 484.



Wenn die Löthstellen auf der einen Seite nur die geringste Temperaturerhöhung erfahren, so wird die Multiplicatornadel sogleich aus dem magnetischen Meridiane abgelenkt.

Thierische Elektricität. Es ist schon lange bekannt, daß es Fische 220
giebt, welche elektrische Schläge zu geben im Stande sind; unter diesen sind der Zitterrochen und der Zitteraal die ausgezeichnetsten. Der Zitterrochen kommt im mittelländischen Meere und im atlantischen Oceane, der Zitteraal aber in den Landseen Südamerikas vor.

Nimmt man den Fisch aus dem Wasser, so erhält man einen Schlag, wenn man mit der einen Hand den Bauch, mit der anderen den Rücken anfaßt.

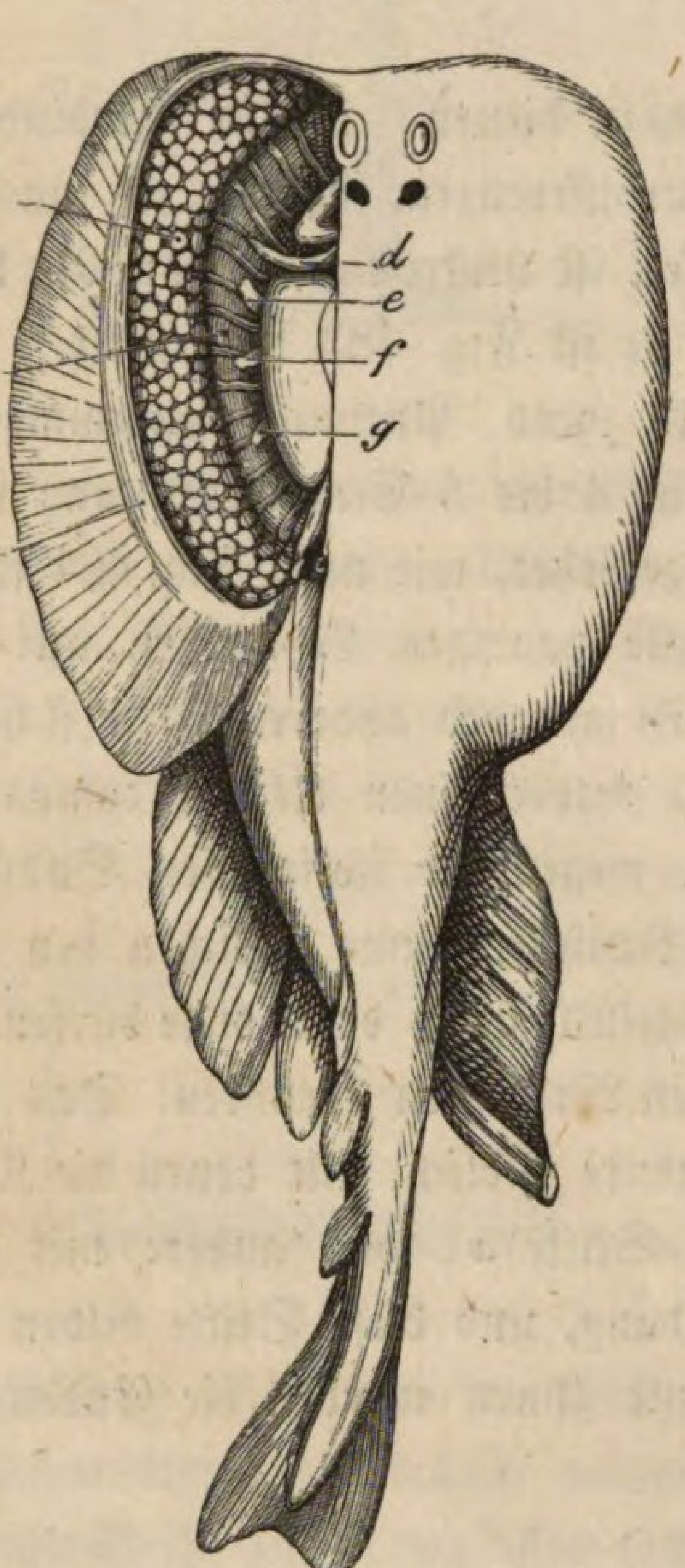
Wenn sich das Thier im Wasser befindet, so ist eine unmittelbare Berührung desselben zur Ertheilung eines Schlages nöthig.

Das Ertheilen eines elektrischen Schlages liegt ganz in der Willkür des Thieres.

Der Rücken des Thieres ist positiv, der Bauch negativ elektrisch; der elektrische Strom, welcher durch einen Leitungsdraht geht, der den Rücken mit dem Bauche verbindet, bringt alle Wirkungen elektrischer Ströme, wenn auch zum Theil in schwachem Maaße, hervor.

Das Organ in welchem sich die Elektricität entwickelt, hat bei den verschiedenen elektrischen Fischen im Wesentlichen dieselbe Textur, dasselbe Ansehen, obgleich seine Gestalt, seine Größe und seine Anordnung verschieden ist. Wir wollen nun versuchen, eine Idee von dem Organe des Zitterrochens zu geben, welches am genauesten untersucht worden ist.

Fig. 485.



Die Fig. 485 stellt einen Zitterrochen von oben gesehen dar, welcher auf der einen Seite geöffnet ist, so daß man das elektrische Organ sieht. Es geht vorn bis dicht an den Vorderrand des Kopfes, seine obere Fläche stößt mittelst einer faserigen Haut an die Haut des Rückens, seine untere an die des Bauches; seine äußere Fläche ruht an dem Knorpel der Seitenflosse, seine innere an der Muskulatur des Kopfes und des vorderen Theiles des Rumpfes. Von oben oder unten gesehen, zeigt das elektrische Organ polygonale oder rundliche Abtheilungen, Fig. 486; von der Seite aber sieht man parallele Streifen, wie Fig. 487 zeigt. Das ganze Organ besteht also aus einer Menge polygonaler oder rundlicher Säulchen, deren Axe die Richtung vom Bauche zum Rücken hat. Die Randbegrenzung jeder Säule bildet eine etwas dichtere sehnigte Membrane, welche, wie es scheint, dieselben Dienste leistet wie die Glasstäbe, zwischen welchen die galvanische Säule aufgebaut wird. Jedes Säulchen besteht aus einer Menge auf einander geschichteter feiner Blättchen; diese kleinen, bald ebenen, bald gebogenen Blättchen sind durch sehr klebrige Schleimschichten von einander getrennt, und somit bieten diese Säulchen in ihrer Construction eine große Aehnlichkeit mit einer aufgebauten galvanischen Säule dar.

Fig. 486.

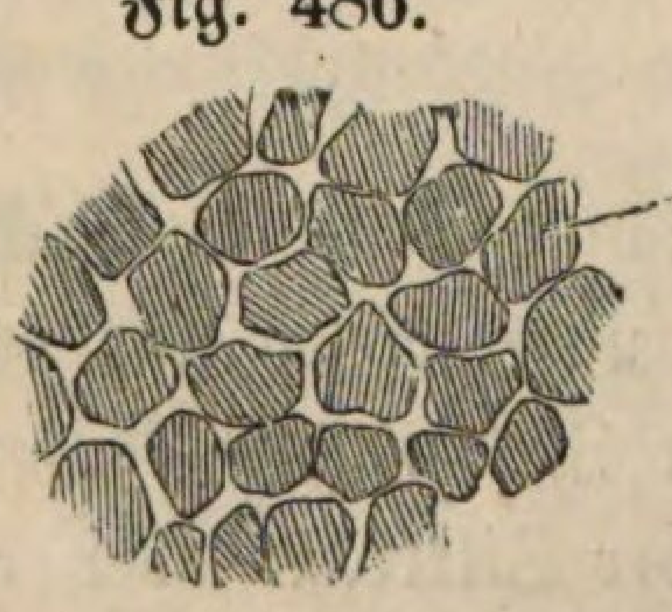


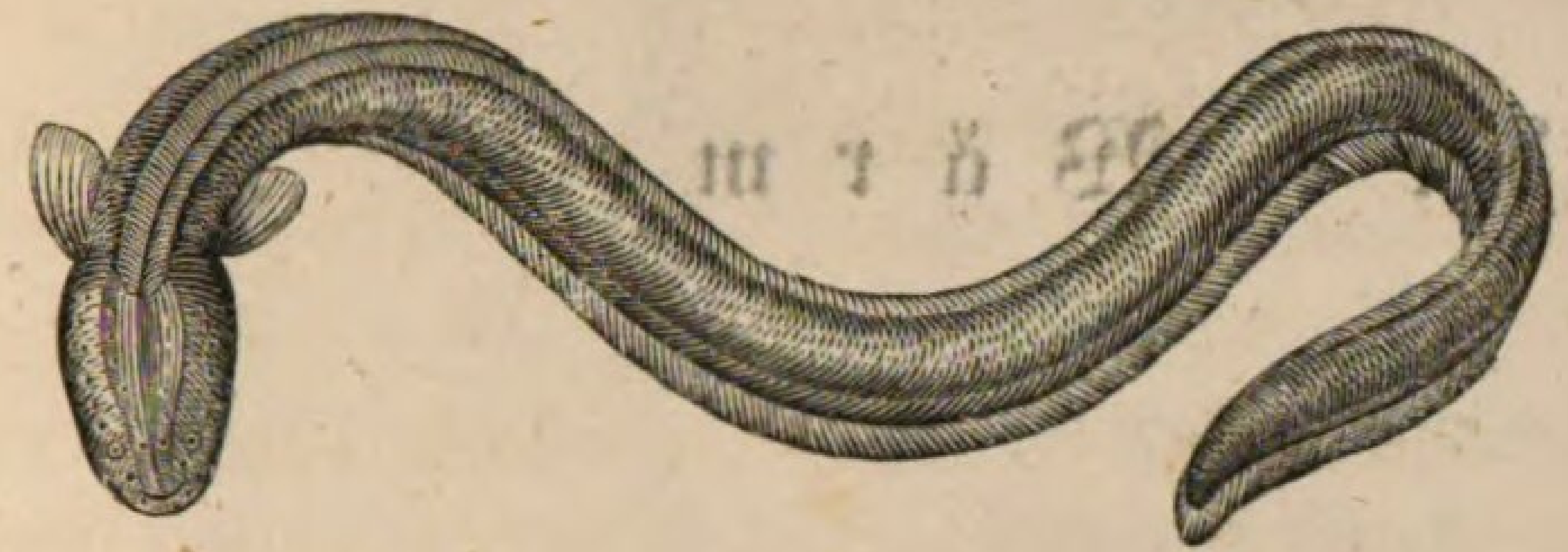
Fig. 487.



Man zählt bei dem Zitterrochen gewöhnlich 400 bis 500 solcher Säulchen auf jeder Seite desselben.

Bei dem Zitteraale, Fig. 488, liegt das elektrische Organ in dem sehr langen Schwanze. Bei diesem Thiere nämlich liegt der After so weit nach vorn, daß der Schwanz des Gymnotus fast $4\frac{1}{2}$mal so lang ist als Kopf und Rumpf zusammengenommen, das elektrische Organ liegt fast der ganzen Länge des Schwanzes nach auf jeder Seite und unterhalb desselben, so daß der elektrische Apparat dieses Thieres eine bedeutende Ausdehnung hat, woher es denn auch kommt, daß der Zitteraal so außerordentlich starke Schläge ertheilen kann.

Fig. 488.



Bei dem Gymnotus stehen die Säulchen, welche das elektrische Organ bilden, nicht senkrecht wie beim Zitterrochen, sondern sie laufen in der Richtung des Schwanzes fort, so daß die Scheibchen, aus denen sie bestehen, senkrecht stehen; daher kommt es denn auch, daß beim Zitteraale der positive Strom in der Richtung vom Kopfe nach dem Schwanze, also nicht wie beim Zitterrochen vom Rücken zum Bauche geht.

Im thierischen Organismus sind jedoch auch electrische Ströme nachgewiesen worden, welche nicht durch besondere elektrische Organe hervorgebracht werden. Nobili hat gefunden, daß, wenn man mit dem einen Drahtende eines empfindlichen Multiplicators den Kopf, mit dem anderen Drahtende die Füße eines lebenden oder frisch getödteten Frosches berührt, ein Strom vom Kopfe nach den Füßen geht; ebenso läßt sich ein Strom nachweisen, wenn man in den Muskel irgend eines Thieres einschneidet und den äußeren Muskel mit der Schnittfläche durch den Multiplicatordraht verbindet.

Du Bois-Reymond hat die Gesetze des Muskelstromes näher bestimmt, und auch ähnliche Stromwirkungen an den Nerven nachgewiesen.

Siebenter Abschnitt.

Von der Wärme.

Erstes Kapitel.

Ausdehnung.

220 Unser Gefühlsvermögen unterscheidet verschiedene Zustände an den Körpern, die wir mit heiß, warm, kalt u. s. w. bezeichnen. Wenn ein Körper, den wir kalt nennen, warm wird, wenn er heiß wird, so nimmt er auch an Volumen zu, er dehnt sich.

Die unbekannte Ursache, welche diese Ausdehnung der Körper bewirkt, und welche zugleich die verschiedenen eben erwähnten Empfindungen unseres Gefühlsvermögens veranlaßt, nennt man Wärme.

Die Wärme bewirkt nicht allein eine Ausdehnung der Körper, sondern sie ist auch im Stande, die Aggregatzustände der Körper zu verändern, sie bewirkt die Schmelzung fester und die Verdampfung flüssiger Körper. Wir wollen nun im Folgenden die Gesetze dieser Erscheinungen näher betrachten.

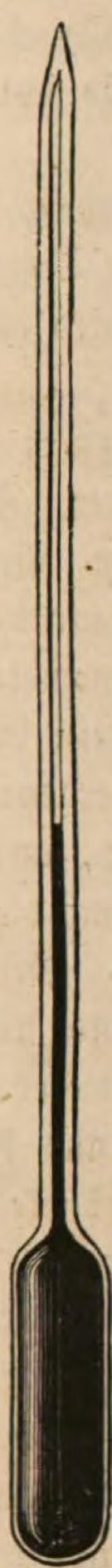
221 **Das Thermometer.** Da alle Körper durch die Wärme ausgedehnt werden und da das Volumen eines Körpers von dem Grade seiner Erwärmung abhängt, so kann die Ausdehnung eines Körpers dazu dienen, um den Grad seiner Erwärmung zu messen. Man nennt die Temperatur eines Körpers den Grad seiner Erwärmung, die Instrumente aber, welche man anwendet, um die Temperatur zu bestimmen, nennt man Thermometer.

Fig. 489 stellt ein Quecksilberthermometer dar. An dem unteren Ende einer engen Glasröhre befindet sich ein kugelförmiges oder cylindrisches Gefäß; dies Gefäß und ein Theil der Röhre ist mit Quecksilber gefüllt. Durch Erwärmung vermehrt sich das Volumen des Quecksilbers, es steigt in der Röhre, und man sagt, die Temperatur sey erhöht worden. Wenn die Kugel erkaltet, vermindert sich das Volumen des Quecksilbers wieder, das Quecksilber sinkt in der Röhre, und man sagt, die Temperatur sey gefallen.

Bei gleicher Temperatur nimmt der Gipfel der Quecksilbersäule auch stets

dieselbe Stelle in der Röhre ein. Wenn man ein anderes größeres oder kleineres Thermometer mit dem ersteren vergleicht, so werden beide mit einander

Fig. 489. Fig. 490.





steigen und fallen, aber die absolute Größe des Steigens und Fallens kann doch sehr verschieden seyn. Wenn z. B. die beiden Kugeln gleich sind, aber die eine Röhre einen zehnmal größeren Querschnitt als die andere hat, so würde bei gleicher Temperaturerhöhung das Quecksilber in der engen Röhre zehnmal so hoch steigen als in der anderen.

Ein solches Thermometer kann nur dazu dienen, zu sehen, ob eine bestimmte Temperatur stattfindet, oder ob sie höher oder tiefer sey, je nachdem der Gipfel der Quecksilbersäule in der Röhre an einer bestimmten Stelle höher oder tiefer steht. Ein solches Instrument würde schon von einigem Nutzen für die Wissenschaft seyn; durch die Graduirung aber werden die Thermometer doch eigentlich erst brauchbare Instrumente, denn durch die Graduirung ist es möglich, die Temperaturen in Zahlen auszudrücken, sie zu vergleichen und die Gesetze der Wärme auszumitteln.

Zur Construction von Thermometern darf man natürlich nur solche Glasröhren anwenden, welche ihrer ganzen Länge nach gleich weit sind, was man daran erkennt, daß ein Quecksilberfaden, den man in einer solchen Röhre hin und her laufen läßt, an allen Stellen derselben gleiche Länge hat.

Nachdem an der Röhre ein Gefäß angeblasen worden ist, wird dasselbe mit Quecksilber gefüllt. Um das Quecksilber einzufüllen, wird an das obere Ende der Röhre ein Stück einer weiteren Glasröhre angelöthet, und eine genügende Menge Quecksilber in das dadurch gebildete trichterförmige Gefäß, *h* Fig. 490, gegossen. Erwärmt man nun das Gefäß *t*, so dehnt sich die darin enthaltene Luft aus und entweicht in Bläschen durch das Quecksilber in *h*. Beim Erkalten von *t* zieht sich die ausgedehnte Luft wieder zusammen, und aus *h* dringt jetzt das Quecksilber durch die enge Röhre in das Gefäß *t*, um die Stelle der durch Erwärmung ausgetriebenen Luft einzunehmen. Auf diese Weise wird ein Theil des Gefäßes *t* mit Quecksilber gefüllt. Bei abermaliger Erwärmung des Gefäßes *t* wird von Neuem ein Theil der eingeschlossenen Luft ausgetrieben; die Erwärmung wird aber jetzt so weit fortgesetzt, bis das Quecksilber in *t* ins Kochen kommt, und nun nehmen die mit Heftigkeit entweichenden Dämpfe des Quecksilbers die noch übrige Luft vollstän-

dig mit fort. Beim Erkalten verdichten sich die Dämpfe in *t*, und aus *h* sinkt nun das Quecksilber herab, um den leeren Raum in *t* auszufüllen.

Ist auf diese Weise das Gefäß *t* sammt der Röhre mit Quecksilber gefüllt und der Apparat vollständig erkaltet, so wird das überflüssige Quecksilber aus *h* ausgegossen und dann die Röhre dicht unter diesem Gefäße vor der Glasbläserlampe zu einer feinen Spitze ausgezogen.

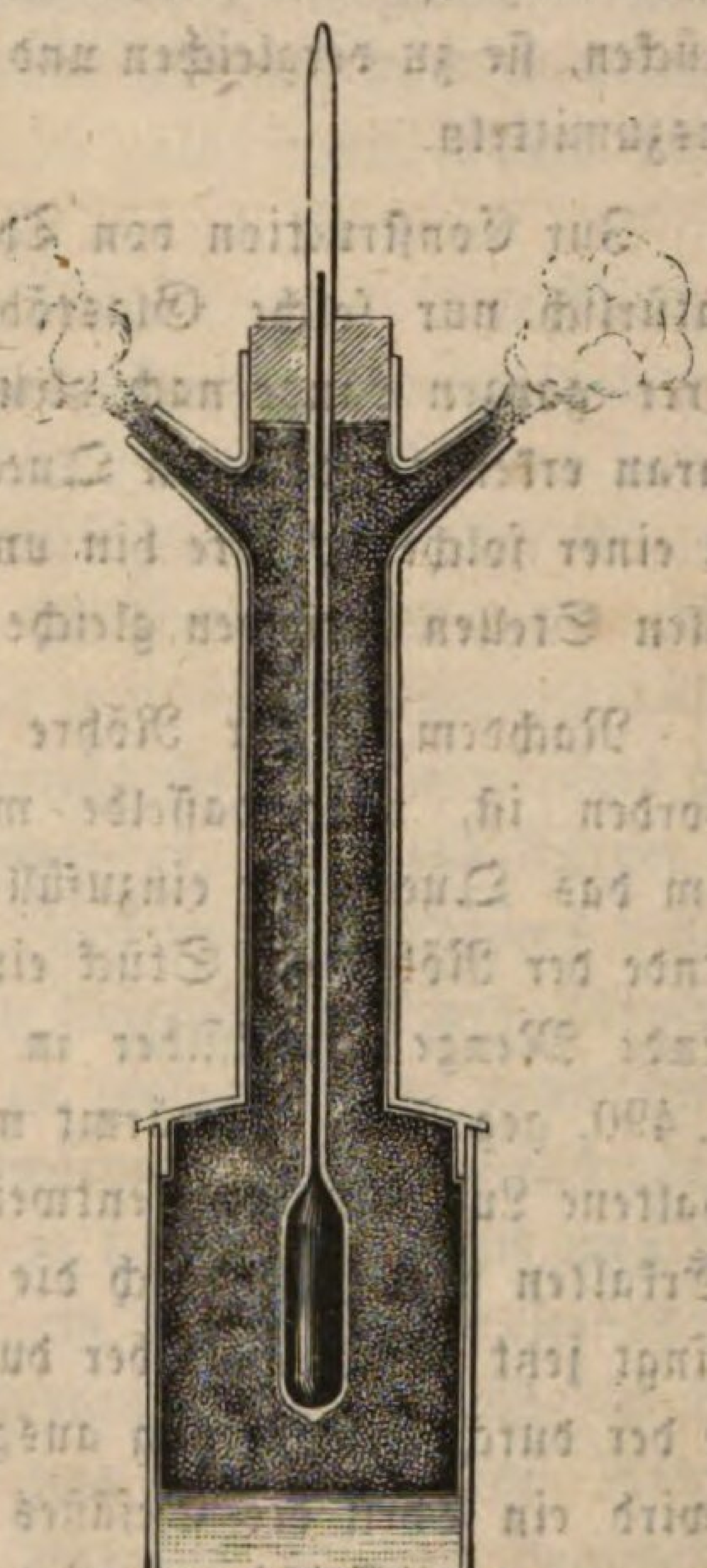
Ehe das Thermometer verschlossen wird, muß es regulirt werden, d. h. man treibt noch so viel Quecksilber aus, wie es gerade der mittleren Temperatur entspricht, für welche das Thermometer bestimmt ist; alsdann wird es zugeschmolzen.

Das Graduiren der Thermometer besteht darin, daß man zwei fixe Punkte auf der Röhre markirt und den Zwischenraum (den Fundamentalabstand) in gleiche Theile theilt. Für die festen Punkte nimmt man in der Regel den Gefrierpunkt und den Siedepunkt des Wassers. Um den Gefrierpunkt zu bestimmen, steckt man die Thermometerkugel und die Röhre, soweit das Quecksilber in derselben reicht, in ein Gefäß mit fein gestoßenem Eise oder Schnee, Fig. 491. Wenn die Temperatur der umgebenden Luft höher ist als der Gefrierpunkt, so schmilzt das Eis, und die ganze Masse nimmt die fixe Temperatur des Gefrierpunktes an. Bald nimmt auch das Thermometer diese Temperatur an und bleibt von dem Augenblicke an vollkommen stationär, und man hat nur mit Genauigkeit den Punkt der Röhre zu markiren, wo gerade der Gipfel der Quecksilbersäule steht. Man bezeichnet diesen Punkt zuerst mit Tinte und alsdann mit einem Diamant.

Fig. 491.



Fig. 492.



Um den Siedepunkt zu bestimmen, nimmt man ein Gefäß mit langem Halse, Fig. 492, in welchem man destillirtes Wasser zum Kochen bringt; nachdem es einige Zeit gekocht hat, sind alle Theile des Gefäßes gleichmäßig erwärmt, und der Dampf entweicht durch die Seitenöffnungen; das Thermometer ist alsdann allenthalben von Dampf umgeben, dessen Tem-

peratur dieselbe ist wie die der obersten Wasserschicht. Das Quecksilber steigt bald bis zu einem Punkte, auf dem es fest stehen bleibt und den es nicht überschreitet. Man bezeichnet diesen Punkt wie den Gefrierpunkt. Wenn in diesem Augenblicke die Barometerhöhe nicht gerade 760 Millimeter ist, so ist eine Correction anzubringen, deren Werth weiter unten, wo vom Sieden die Rede seyn wird, angegeben werden soll.

Bei dem Centesimalthermometer wird der Zwischenraum, der Fundamentalabstand, in 100 Theile getheilt, und so erhält man die Thermometerscala.

Der Gefrierpunkt ist der Nullpunkt der Scale, welche in gleicher Weise wie oberhalb, auch unterhalb des Nullpunktes fortgesetzt wird. Die Grade unter 0 werden durch — bezeichnet.

Man kann Quecksilberthermometer construiren, welche bis zu 360 Grad gehen; weiter aber kann man nicht gehen, weil man sonst dem Siedepunkte des Quecksilbers (400°) zu nahe kommt. Unter Null sind die Angaben des Quecksilberthermometers richtig bis −30° oder −35°. Bei noch geringerer Temperatur kommt man dem Gefrierpunkte des Quecksilbers (—40°) zu nahe. In der Nähe der Temperaturen nämlich, bei welchen die Körper ihren Aggregatzustand ändern, ist ihre Ausdehnung nicht mehr regelmäßig.

Nicht bei allen Thermometern ist der Fundamentalabstand in 100 Grade getheilt. In Deutschland und Frankreich ist das Réaumur'sche Thermometer noch sehr verbreitet, bei welchem dieser Abstand in 80 Grade getheilt ist, obgleich man sich bei wissenschaftlichen Untersuchungen jetzt fast ausschließlich des von Celsius zuerst angegebenen hunderttheiligen Thermometers bedient. Es ist jedoch leicht, Celsius'sche Grade auf Réaumur'sche zu reduciren, und umgekehrt, denn da

$$100^\circ \text{ C.} = 80^\circ \text{ R.},$$

so ist

$$1^\circ \text{ C.} = 0{,}8^\circ \text{ R.}$$

und

$$1^\circ \text{ R.} = 1{,}25^\circ \text{ C.}$$

Es sind demnach x° C. $= x \,.\, 0{,}8^\circ$ R. und n° R. $= n \,.\, 1{,}25^\circ$ C. Man kann dies in Worten so ausdrücken: Um Réaumur'sche Grade in Celsius'sche zu verwandeln, multiplicirt man die Zahl der Réaumur'schen Grade mit 1,25 oder mit $^5/_4$. Will man umgekehrt Celsius'sche Grade zu Réaumur'sche verwandeln; so multiplicirt man die gegebene Gradzahl mit 0,8 oder, was dasselbe ist, mit $^4/_5$.

In England bedient man sich ausschließlich der Fahrenheit'schen Scala, deren Nullpunkt nicht mit dem der eben beiden erwähnten zusammenfällt. Der Nullpunkt des Fahrenheit'schen Thermometers trifft mit dem Theilstriche $-17^7/_9$ der Celsius'schen Scala zusammen. Der Schmelzpunkt des Eises ist auf derselben mit 32, der Siedepunkt des Wassers mit 212 bezeichnet, so daß also der Zwischenraum zwischen dem Gefrierpunkte und dem Siedepunkte des

Wassers hier in 180 Grade getheilt ist. Es sind also dem absoluten Werthe nach

$$180^\circ \text{ F.} = 100^\circ \text{ C.},$$

mithin

$$1^\circ \text{ F.} = \tfrac{5}{9}{}^\circ \text{ C.}$$

und

$$1^\circ \text{ C.} = \tfrac{9}{5}{}^\circ \text{ F.}$$

Um jedoch die Angaben des einen dieser Thermometer auf die des anderen zu reduciren, hat man noch zu berücksichtigen, daß die Nullpunkte derselben nicht zusammenfallen. Will man Fahrenheit'sche Grade in Celsius'sche verwandeln, so hat man von der gegebenen Gradzahl 32 abzuziehen und den Rest mit $\tfrac{5}{9}$ zu multipliciren. Es sind demnach

$$x^\circ \text{ F.} = (x - 32)\ \tfrac{5}{9}{}^\circ \text{ C.}$$

Will man Celsius'sche Grade in Fahrenheit'sche verwandeln, so multiplicirt man mit $\tfrac{9}{5}$ und addirt zum Product 32. Es sind demnach

$$y^\circ \text{ C.} = (y \,.\, \tfrac{9}{5} + 32)^\circ \text{ F.}$$

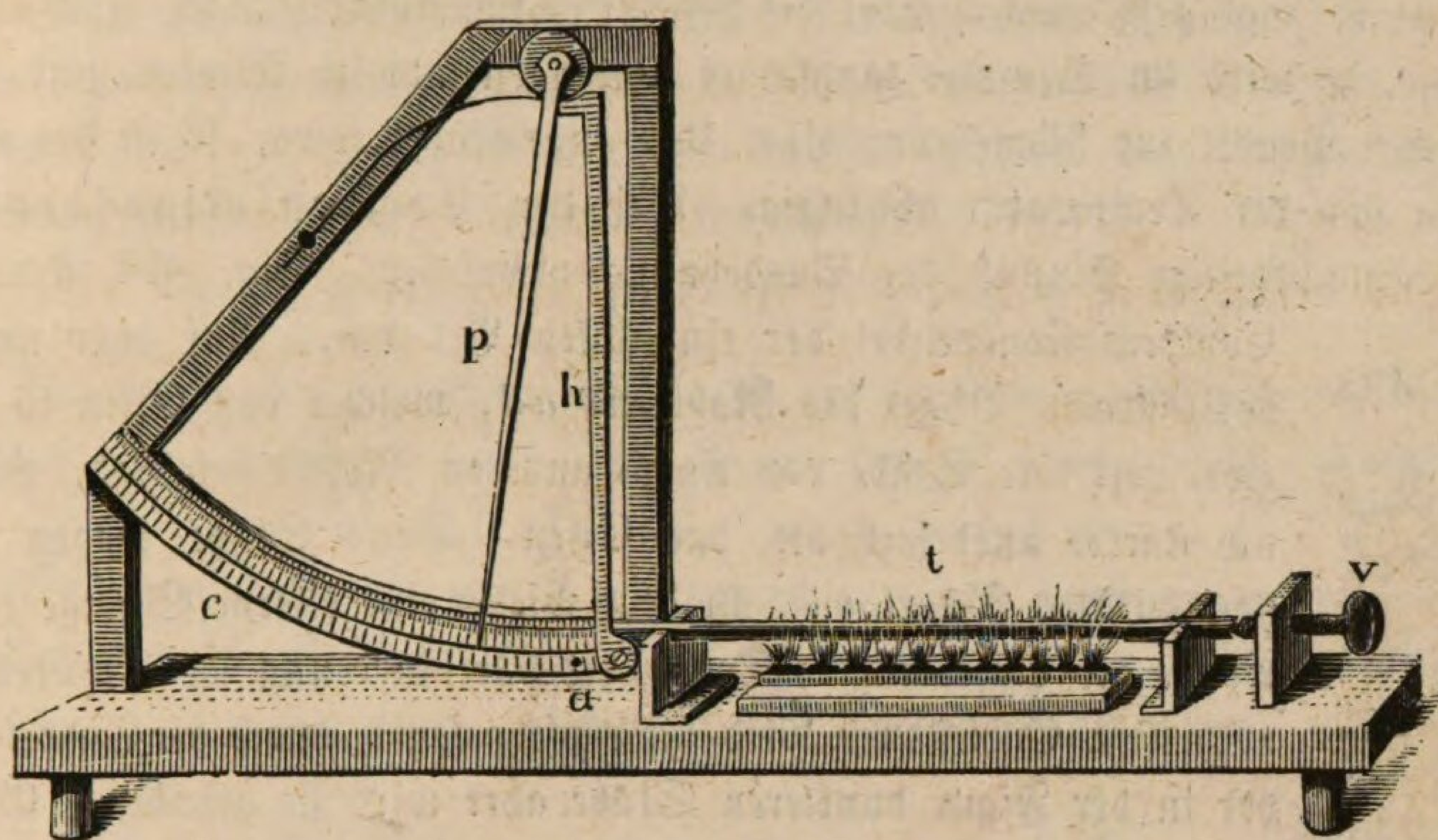
Zur leichteren Vergleichung der verschiedenen Scalen mag folgende Tabelle dienen.

Celsius.	Réaumur.	Fahrenheit.
− 20	− 16	− 4
− 10	− 8	+ 14
0	0	32
+ 10	+ 8	50
20	16	68
30	24	86
40	32	104
50	40	122
60	48	140
70	56	158
80	64	176
90	72	194
100	80	212

222 **Ausdehnung fester Körper.** Weil die Ausdehnung fester Körper durch die Wärme sehr gering ist, so muß man auf Mittel sinnen, durch welche sie dem Auge vergrößert wird. Dies geschieht z. B. beim Hebelpyrometer, Fig. 493. Die Stange *t*, deren Ausdehnung man beobachten will, steht mit ihrem einen Ende gegen die feste Schraube *v* an; das andere Ende des Stabes steht aber an einem Hebel *h* und zwar nahe an seinem Drehpunkt an, so daß das obere Ende dieses Hebels *h* schon einen ziemlich bedeutenden Weg zurücklegt, wenn sich die Stange *t* auch nur wenig ausdehnt. Die Bewegung des oberen Endes von *h* wird aber in gleicher Weise noch einmal durch den Hebel *p* vergrößert, dessen freies Ende sich an einem Gradbogen *ca* hin bewegt.

Wenn sich beim Erkalten die Stange *t* wieder zusammenzieht, so werden die Hebel durch eine schwache Feder wieder zurückgedrückt.

Fig. 493.



Mit Hülfe von Apparaten, welche im Wesentlichen auf dem eben angedeuteten Principe beruhen, wurde die Ausdehnung vieler Körper ermittelt; es folgen hier nur einige der wichtigsten.

Für eine Temperaturerhöhung von 0 bis 100° C. dehnt sich aus:

Platin	um	0,00086	oder	$^1/_{1167}$
Glas	»	0,00087	»	$^1/_{1147}$
Stahl, gehärtet . . .	»	0,00124	»	$^1/_{807}$
Eisen	»	0,00122	»	$^1/_{819}$
Kupfer	»	0,00171	»	$^1/_{584}$
Zinn	»	0,00217	»	$^1/_{462}$
Blei	»	0,00285	»	$^1/_{351}$
Zink	»	0,00294	»	$^1/_{340}$

seiner Länge. Ein Stahlstab also, welcher bei 0° eine Länge von 807 Linien hat, wird bei 100° eine Länge von 808 Linien haben; ein Zinkstab von nur 340 Linien Länge wird sich aber bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 100° ebenfalls schon um 1 Linie ausdehnen. Unter allen oben angeführten Körpern dehnt sich Platin am wenigsten, Zink am stärksten aus.

Zwischen 0 und 100° dehnen sich fast alle festen Körper gleichmäßig aus, d. h. ihre Ausdehnung ist der Temperaturerhöhung proportional. Bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 10° dehnt sich also das Kupfer um 0,000171, bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 1° dehnt es sich um 0,0000171 seiner Länge aus.

Die Zahl, welche ausdrückt, um den wievielsten Theil seiner Länge bei 0° sich ein fester Körper bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 100° ausdehnt, heißt der Längenausdehnungscoefficient. Die obige Tabelle giebt daher Coefficienten für Platin, Glas, Stahl u. s. w. an.

Mannigfache praktische Anwendungen, welche man von der Ausdehnung fester Körper durch die Wärme macht, wollen wir hier bloß andeuten.

Da alle Körper sich durch die Wärme ausdehnen, so wird ein aus einer einfachen Stange gebildetes Pendel bei höherer Temperatur länger seyn als bei niedriger, es wird im Sommer langsamer schwingen als im Winter, und wenn ein solches Pendel zur Regulirung einer Uhr angewendet wird, so ist der Gang der Uhr von der Temperatur abhängig. Bei den Compensationspendeln ist dieser nachtheilige Einfluß der Ausdehnung vermieden. Fig. 494 stellt ein Compensationspendel der einfachsten Art dar. Auf dem unteren horizontalen Bügel des Rahmens *ad*, welcher von Eisen ist, sind zwei vertikale Stäbe von einem anderen Metall befestigt, welches sich stärker ausdehnt als das Eisen. Diese Stäbe tragen einen horizontalen Bügel *nx*, an dem wieder eine eiserne Stange hängt, welche die Linse trägt. Durch die Verlängerung der äußeren und mittelsten Eisenstange wird die Linse gesenkt, durch die Ausdehnung der in der Figur dunkleren Stäbe aber wird sie gehoben. Gesetzt, jede der helleren Stangen verlängere sich um 1 Millimeter, so wird dadurch die Linse um 2 Millimeter gesenkt; wenn aber nun jede der dunkleren Stangen sich um 2 Millimeter verlängert, so wird die Linse dadurch wieder um 2 Millimeter gehoben, die Pendellänge bleibt also unverändert.

Fig. 494.



Wenn ein Körper durch Erwärmung ausgedehnt wird, so findet dies mit großer Kraft Statt, d. h. es können sehr bedeutende Hindernisse, welche der Ausdehnung entgegen stehen, überwunden werden. Ebenso zieht sich ein Körper beim Erkalten mit großer Kraft zusammen. Legt man einen heißen eisernen Reif um ein Rad, so daß er eben paßt, so wird nach der Erkaltung der Reif das Rad so fest zusammenhalten, wie man es auf keine andere Weise zu erreichen im Stande wäre.

223 **Die kubische Ausdehnung** ist die Vergrößerung, welche das Volumen eines Körpers durch die Temperaturerhöhung erleidet. Auch hier wird das Volumen des Körpers bei 0° zum Ausgangspunkt genommen, und unter dem Ausdehnungscoefficienten versteht man hier die Zahl, welche angiebt, um den wievielsten Theil seines ursprünglichen Volumens bei 0° sich ein Körper ausdehnt, wenn man ihn bis auf 100° erwärmt. Wenn man sagt, der Ausdehnungscoefficient des Quecksilbers sey 0,018, so heißt das, das Quecksilber dehnt sich bei einer Temperaturerhöhung von 100° um $^{18}/_{1000}$ seines Volumens bei 0° aus. Kennt man den Ausdehnungscoefficienten und das Volumen eines Körpers bei 0°, so kann man sein Volumen für eine beliebige Temperatur berechnen, vorausgesetzt, daß die Ausdehnung des Körpers bis zu dieser Temperatur regelmäßig ist.

Bei tropfbar-flüssigen und gasförmigen Körpern wird durch den Versuch unmittelbar die körperliche Ausdehnung bestimmt, während bei festen Körpern die körperliche Ausdehnung aus der beobachteten linearen berechnet werden muß.

Der Ausdehnungscoefficient für die körperliche Ausdehnung

fester Körper ist dreimal so groß als der Ausdehnungscoefficient für lineare Ausdehnung.

Man kann sich davon durch folgende Schlußweise überzeugen. Es sey l die Seite eines Würfels bei 0^0, so ist l^3 das Volumen desselben, welches wir mit v bezeichnen wollen; wenn nun der Würfel bis auf 100^0 erwärmt wird, so ist jede Seite $l\,(1 + r)$, wenn r den Coefficienten für die Längenausdehnung bezeichnet, mithin ist jetzt der Inhalt des Würfels:

$$v' = l^3\,(1 + r)^3 = l^3\,(1 + 3\,r + 3\,r^2 + r^3).$$

Da aber r eine sehr kleine Größe ist, so kann man die höheren Potenzen derselben vernachlässigen, und der Werth von v' reducirt sich demnach auf

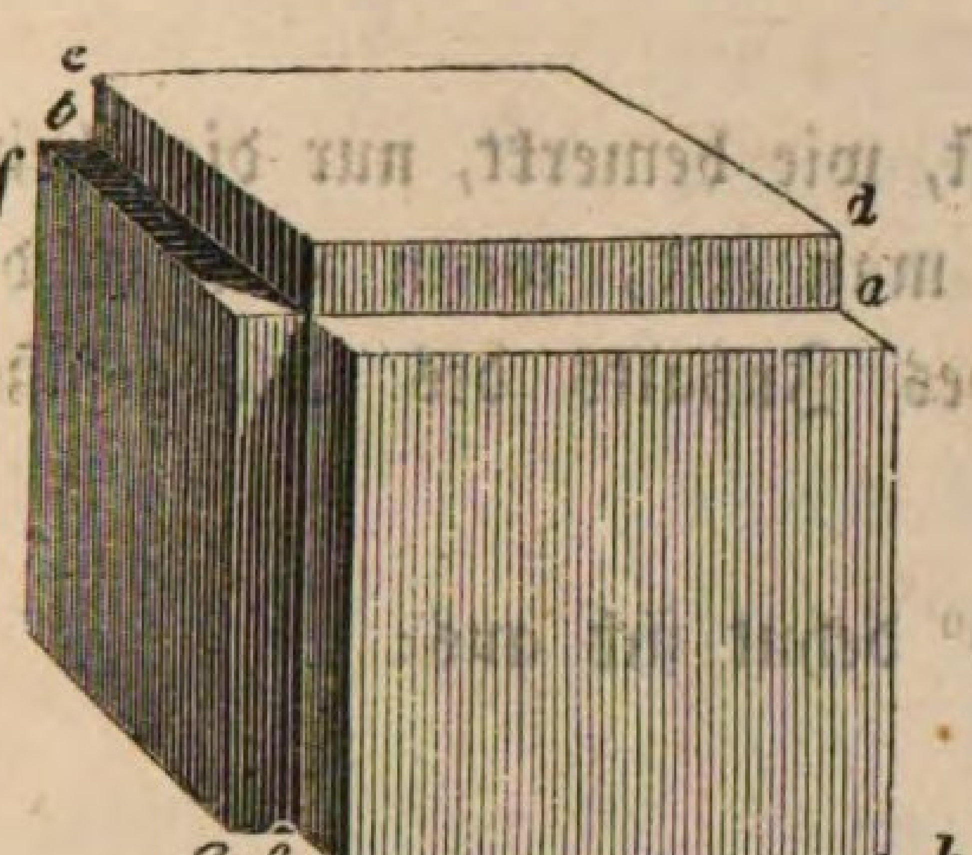
$$v' = l^3\,(1 + 3\,r) = v\,(1 + 3\,r).$$

Das Volumen v ist also um $3\,rv$ gewachsen; der Ausdehnungscoefficient für das Volumen ist also $3\,r$.

Wir wollen versuchen, dies noch auf geometrischem Wege anschaulich zu machen.

Es sei abc Fig. 495 ein aus irgend einem festen Körper gebildeter Würfel bei 0^0. Wenn nun dieser Würfel bei einer Temperaturerhöhung von 100^0 sich nur nach oben ausdehnte, so würde sein Volumen um die quadratische Platte $adeb$ zunehmen, deren Inhalt vr ist, wenn v das Volumen des ursprünglichen Würfels und r der Längen-Ausdehnungscoefficient ist. Wenn sich der Würfel nur nach der linken Seite hin ausdehnte, so würde er hier um eine eben so große Platte $cgbf$ wachsen, und eine dritte Platte cah endlich, deren Inhalt gleichfalls rv ist, das Resultat der Ausdehnung des Körpers nach vorn seyn. Der kubische Inhalt dieser drei Platten zusammen ist $3\,rv$. Zur Vollendung des durch die Wärme vergrößerten Würfels müßte freilich noch der Inhalt der Ecken hinzuaddirt werden, welche da einzupassen sind, wo je zwei der eben betrachteten Platten mit einer Kante zusammentreffen; allein die Größe derselben so ist unbedeutend, daß sie vernachlässigt werden kann, da ja die Größe der linearen Ausdehnung da sehr klein ist im Vergleich zu der Länge der Seiten des ursprünglichen Würfels, und man kann also $3\,rv$ ohne merklichen Fehler für die ganze Zunahme des Volumens annehmen.

Fig. 495.



Der Coefficient für die Längenausdehnung des Glases z. B. ist 0,00087, bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 100^0 wird demnach eine Glasmasse um 0,00251 ihres Volumens zunehmen; dasselbe gilt natürlich auch vom Inhalte eines Glasgefäßes. Wenn ein Glasgefäß bei 0^0 gerade 1000 Kubikcentimeter faßt, so wird sein Inhalt bei 100^0 bis auf 1002,51 Kubikcentimeter gewachsen sein.

Ausdehnung der Flüssigkeiten. Um die Ausdehnung verschiedener 224

flüssiger Körper zu bestimmen, kann man den Apparat Fig. 496 anwenden. Der

Fig. 496.



Hals eines Glasgefäßes von entsprechender Größe ist an einer Stelle ganz eng ausgezogen, so daß sich über der engen Stelle gewissermaßen ein Trichter befindet. Die engste Stelle des Halses *a* ist auf irgend eine Weise markirt. Man füllt nun die Kugel mit der zu untersuchenden Flüssigkeit, so daß sie noch über *a* hinaus im Trichter steht, und erkaltet das Ganze bis auf 0°, indem man den ganzen Apparat mit schmelzendem Schnee oder schmelzendem Eise umgiebt. Ist Alles bis auf 0° erkaltet, so entfernt man alle Flüssigkeit, welche noch über der Marke steht. Wenn man die so gefüllte Kugel wiegt und vom gefundenen Gewichte das des Glasgefäßes abzieht, so erhält man das Gewicht der Flüssigkeit, welche bei 0° in die Kugel geht. Sobald man die Kugel erwärmt, dehnt sich die Flüssigkeit aus, sie steigt über die Marke *a* in den Trichter. Wenn man bis zu einer bestimmten Temperatur, etwa bis auf 100°, erwärmt hat, nimmt man alle über *a* stehende Flüssigkeit wieder weg und wiegt dann von Neuem. Nach den beiden Wägungen läßt sich dann leicht die scheinbare Ausdehnung berechnen.

Die auf diese Weise bestimmte Ausdehnung ist, wie bemerkt, nur die scheinbare; die wahre Ausdehnung der Flüssigkeit findet man erst, wenn man zu der scheinbaren Ausdehnung noch die Vergrößerung des Inhalts des Glasgefäßes durch die Wärme addirt.

Bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 100° dehnt sich aus:

Quecksilber	um	0,018
Wasser . .	»	0,045
Wingeist .	»	0,100
Oel	»	0,100

seines Volumens bei 0°. Bei Weingeist und Oel ist also die Ausdehnung durch die Wärme sehr bedeutend, so daß im Handel auf diesen Umstand wohl Rücksicht genommen werden muß.

Die meisten Flüssigkeiten dehnen sich zwischen 0 und 100° nicht regelmäßig aus. Am besten läßt sich dies zeigen, wenn man Thermometer von verschiedenen Flüssigkeiten construirt und ihren Gang mit einem Quecksilberthermometer vergleicht. Wenn man z. B. ein Wasserthermometer, welches längere Zeit einer Temperatur von 0° ausgesetzt war, erwärmt, so steigt es nicht gleich, sondern es sinkt und beginnt erst wieder zu steigen, wenn die Temperatur über $5^3/_4$° gestiegen ist. Bringt man die Ausdehnung des Glases in Rechnung, so ergiebt sich daraus, daß das Wasser bei 4° ein Dichtigkeitsmaximum hat, d. h. bei 4° ist das Wasser dichter als bei jeder anderen Temperatur. Wasser von 4° wird sich ausdehnen, mag man es nun erwärmen oder erkalten.

Auch der Weingeist dehnt sich nicht ganz regelmäßig aus, weshalb ein Wein-

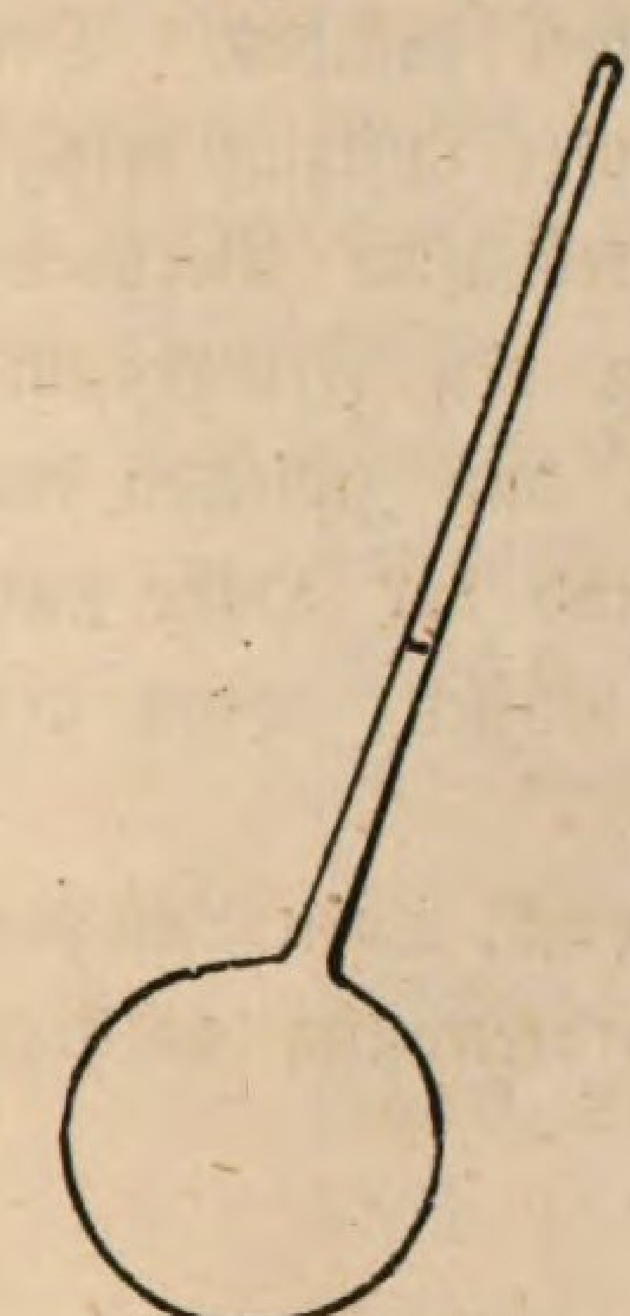
geistthermometer nicht bei allen Temperaturen mit einem Quecksilberthermometer harmoniren kann.

Ausdehnung der Gase. Die Gase dehnen sich durch Erwärmung weit 225
stärker aus als die festen und flüssigen Körper, auch ist der Ausdehnungscoefficient für alle Gase fast genau derselbe, und endlich dehnen sich die Gase stets der Temperaturerhöhung proportional aus.

Bei einer Temperaturerhöhung von 100° beträgt die Ausdehnung der Gase 0,365 ihres Volumens bei 0°.

Zur Bestimmung des Ausdehnungscoefficienten der Gase hat man verschiedene Methoden angewendet, unter denen wohl folgende die einfachste ist. Eine Glaskugel ist, wie man Fig. 497 sieht, am Ende einer dünnen Glasröhre angeblasen; das andere Ende dieser Glasröhre ist in eine feine Spitze ausgezogen. Wenn man nun die Kugel in kochendes Wasser taucht, so natürlich, daß die Spitze ziemlich weit herausragt, so wird sich die Luft in derselben bald bis 100° erwärmen und in Folge dieser Erwärmung zum Theil aus der Kugel austreten. Nun wird die Spitze vor einer Weingeistlampe zugeschmolzen, und man läßt die Kugel allmälig erkalten; wenn sie ganz kalt geworden ist, kehrt man die Kugel um, steckt die Spitze in Quecksilber und bricht sie ab; nun wird natürlich das Quecksilber in die Kugel eindringen, weil ja die Luft in derselben durch die frühere Erwärmung verdünnt ist.

Fig. 497.



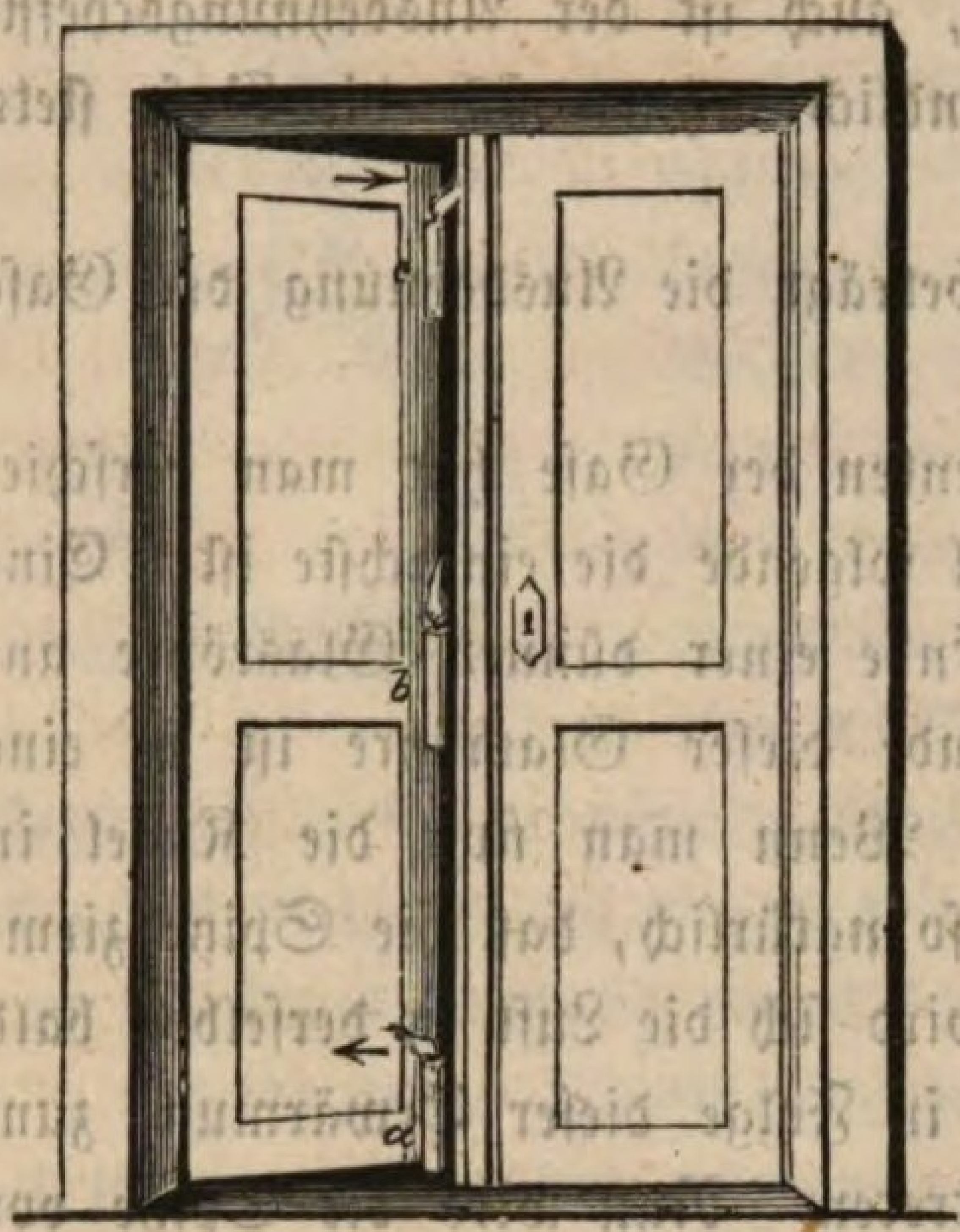
Wenn man die Kugel durch aufgelegten schmelzenden Schnee bis auf 0° erkaltet, so wird das eingedrungene Quecksilber genau den Raum ausfüllen, um welchen sich die in der Kugel zurückgebliebene Luft bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 100° ausdehnt. Bestimmt man die Menge des eingedrungenen Quecksilbers durch Wägung, ermittelt man alsdann das Gewicht der Quecksilbermenge, welche die ganze Kugel zu fassen vermag, so kann man danach den Ausdehnungscoefficienten der Luft berechnen.

Wenn die Luft durch die Wärme ausgedehnt wird, so wird sie specifisch leichter; die erwärmte Luft wird also aufsteigen und kältere zu Boden sinken müssen. In einem geheizten Zimmer steigt die warme Luft an die Decke, oben entströmt dem Zimmer aus allen Ritzen und Fugen die warme Luft, während unten kalte einströmt.

Wenn man im Winter die in einen kalten Raum führende Thür eines geheizten Zimmers etwas öffnet und eine brennende Kerze an das oberere Ende des Spaltes hält, wie man Fig. 498 (s. f. S.) sieht, so zeigt die nach außen gerichtete Flamme einen von dem warmen Zimmer nach dem kalten Raume gerichteten Luftstrom an. Rückt man nun mit der Kerze mehr und mehr herunter, so stellt sich die Flamme immer mehr und mehr aufrecht, ungefähr in der halben Höhe der Oeffnung steht sie ganz still, sie ist hier nicht durch Luftströ-

mungen afficirt; bringt man sie aber noch weiter herunter, so wird die Flamme von außen nach innen getrieben. Man sieht also, daß die erwärmte Luft oben aus-, und daß dagegen unten die kalte Luft in das Zimmer einströmt.

Fig. 498.



Daher kommt es, daß es am Boden eines geheizten Zimmers weit kälter ist als an der Decke, daß sich hohe Zimmer schwerer heizen als niedrige u. s. w.

In einem Schornsteine wird die Luft durch das Feuer erwärmt, die erhitzte Luft steigt in die Höhe und von unten her dringt kalte Luft ein, welche, durch das Feuer streichend, diesem stets Sauerstoff zuführt. Der durch den Schornstein bewirkte Luftzug bringt also die zur Unterhaltung lebhafter Verbrennung nöthige Luftmenge in den Feuerraum. Es versteht sich von selbst, daß zwischen der Größe des Feuerraumes und der Höhe und Weite des Schornsteins die richtigen Verhältnisse stattfinden müssen, wenn der Schornstein seinen Zweck möglichst vollständig erreichen soll.

Auch bei Lampen hat der gläserne Schornstein den Zweck, einen Luftzug zu unterhalten, welcher der Flamme die zur lebhaften Verbrennung nöthige Sauerstoffmenge zuführt.

Zweites Kapitel.

Veränderung des Aggregatzustandes.

226 **Das Schmelzen.** Eine Menge von festen Körpern werden durch die Wärme geschmolzen, d. h. aus dem festen Zustand in den flüssigen übergeführt.

Da die Wärme alle Körper durchdringt und ausdehnt, so liegt die Frage nahe, ob sie auch alle festen Körper schmelzen kann. In dieser Beziehung findet man große Unterschiede unter den Körpern; einige sind leicht schmelzbar und gehen schon bei niedrigen Temperaturen in den flüssigen Zustand über, z. B. Eis, Phosphor, Schwefel, Wachs, Fett u. s. w.; andere bedürfen zum Schmelzen schon höherer Temperaturen, wie Zinn, Blei u. s. w.; endlich giebt es Körper, welche erst bei sehr hohen Temperaturen schmelzen, wie Eisen, Platin. Die Kohle zu schmelzen ist bis jetzt noch nicht gelungen, wenngleich mehrere Physiker behaupten, an den Kanten von Diamanten, die sie dem Versuche un-

terworfen hatten, Spuren von Schmelzung bemerkt zu haben. Der Analogie nach muß man schließen, daß es keine absolut unschmelzbare Körper giebt, daß alle schmelzen würden, wenn man nur hinreichend hohe Temperaturen hervorbringen könnte.

Organische Körper erleiden unter Einwirkung der Wärme meist eine chemische Zersetzung, ehe sie zum Schmelzen kommen.

Wenn ein Körper aus dem festen in den flüssigen Zustand übergeht, beobachtet man zwei merkwürdige Phänomene. Erstens bleibt er fest bis zu einer bestimmten festen Temperatur, welche für denselben Körper unveränderlich ist, und bei welcher allein die Schmelzung beginnen kann; und zweitens ändert sich während des Schmelzens die Temperatur nicht, wie viel Wärme auch in den Körper eindringen mag. Es wird also beim Schmelzen Wärme absorbirt, welche sich gleichsam im Körper versteckt, ohne auf das Gefühl oder das Thermometer weiter zu wirken. Die Unveränderlichkeit des Schmelzpunktes und die Absorption der latenten Wärme sind zwei wesentliche Bedingungen des Schmelzens.

Die folgende Tabelle enthält die Schmelzpunkte verschiedener Substanzen.

Gehämmertes englisches Eisen	1600	Grad
Weiches französisches Eisen	1500	»
Der strengflüssigste Stahl	1400	»
Der leichtflüssigste Stahl	1300	»
Graues Gußeisen, zweite Schmelzung	1200	»
Leichtflüssiges weißes Gußeisen	1050	»
Gold	1250	»
Silber	1000	»
Bronze	900	»
Antimon	432	»
Zink	360	»
Blei	334	»
Wismuth	256	»
Zinn	230	»
Legirung aus 5 Theilen Zinn, 1 Blei	194	»
Schwefel	109	»
Legirung aus 8 Wismuth, 5 Blei, 3 Zinn	100	»
» » 4 Wismuth, 1 Blei, 1 Zinn	94	»
Natrium	90	»
Kalium	58	»
Phosphor	43	»
Stearinsäure	70	»
Weiches Wachs	68	»
Gelbes Wachs	61	»
Stearin	49	bis 43°
Wallrath	49	»

Essigsäure	45 Grad
Seife	33 »
Eis	0 »
Terpentinöl	—10 »
Quecksilber	—39 »

227 **Gebundene Wärme.** Es ist eine bedeutende Menge Wärme nöthig, um Eis oder Schnee von 0° in Wasser von 0° zu verwandeln. Die Wärme ist in dem Wasser gebunden, latent, sie ist für das Gefühl und das Thermometer gleichsam verschwunden.

Wenn 1 Pfund Wasser von 79° mit 1 Pfund Schnee von 0° gemischt werden, so erhält man 2 Pfund Wasser von 0°. Alle Wärme also, welche in dem heißen Wasser enthalten war, ist für das Thermometer spurlos verschwunden, sie ist lediglich dazu verwendet worden, um Schnee von 0° in Wasser von 0° zu verwandeln.

Wenn Schnee oder gestoßenes Eis und Kochsalz gemengt werden, so verbinden sie sich zu einer flüssigen Salzlösung; dabei sinkt die Temperatur bedeutend, weil durch das Flüssigwerden zweier vorher fester Körper viel Wärme gebunden wird. Auf diesem Principe beruhen die sogenannten Kältemischungen.

Bezeichnen wir die Wärmemenge, welche nöthig ist, um die Temperatur von 1 Pfd. Wasser um 1° zu erhöhen, mit 1, so ist die Wärmemenge, welche bei der Schmelzung von 1 Pfd. Schnee gebunden oder latent wird, gleich 79.

So wie bei der Schmelzung des Eises und des Schnees Wärme gebunden wird, so ist dies auch beim Schmelzen anderer Körper der Fall. Folgendes sind die Werthe der latenten Wärme für einige Körper nach Irvine's Bestimmungen:

Schwefel . . .	80
Blei	90
Wachs	97
Zink	274
Zinn	278
Wismuth . . .	305.

Die Bedeutung dieser Zahlen ist leicht einzusehen; während ein Pfund Schnee zu seiner Schmelzung 79 Wärmeeinheiten, d. h. 79mal so viel Wärme nöthig hat, als erforderlich ist, um die Temperatur von einem Pfund Wasser um 1° zu erhöhen, sind zur Schmelzung von einem Pfund Schwefel 80, zur Schmelzung von einem Pfund Blei, Wachs, Zink u. s. w. 90, 97, 274 solcher Wärmeeinheiten nöthig.

So wie beim Schmelzen eines festen Körpers Wärme gebunden wird, so findet auch eine Wärmebindung Statt, wenn ein fester Körper durch Auflösung in den flüssigen Zustand übergeführt wird; man kann sich davon leicht überzeugen, wenn man ein fein gepulvertes, leicht lösliches Salz, etwa Salpeter, in Wasser wirft und die Auflösung durch Umrühren befördert; die Temperatur des Wassers wird dabei um einige Grade sinken

Salpetersaures Ammoniak bringt rasch in Wasser gelöst eine so bedeutende Temperaturerniedrigung hervor, daß man es mit Erfolg als Kältemischung anwenden kann, wenn man weder Eis noch Schnee hat.

Das Festwerden. Beim Uebergange der Körper aus dem flüssigen Zu- 228
stande in den festen beobachtet man ganz analoge Erscheinungen wie beim Schmelzen; es findet nämlich erstens bei einer bestimmten Temperatur Statt, welche mit dem Schmelzpunkte zusammenfällt, und zweitens wird alle latente Wärme, welche beim Schmelzen gebunden worden war, beim Festwerden wieder frei.

Eine Erscheinung, welche das Freiwerden der gebundenen Wärme beim Festwerden flüssiger Körper beweist, ist folgende: Im Jahre 1714 hatte Fahrenheit die Beobachtung gemacht, daß unter gewissen Umständen das reine Wasser bis auf — 10 bis — 12° erkaltet werden könne, ohne zu gefrieren. Manchmal findet dies schon an freier Luft Statt; sicherer aber kann man diese Erscheinung hervorrufen, wenn man dafür sorgt, daß das zu erkaltende Wasser nur einem schwachen Luft- oder Dampfdrucke ausgesetzt ist. Man kann dies dadurch bewirken, daß man in einer Glasröhre, welche oben in eine feine Spitze ausgezogen ist, Wasser ins Kochen bringt, und wenn man denkt, daß durch die Dämpfe alle Luft ausgetrieben worden sey, die feine Spitze zuschmilzt. Es befindet sich alsdann über dem Wasser in dem Glase nur noch Wasserdampf, welcher bei niedrigen Temperaturen nur einen sehr geringen Druck ausübt. Wenn man ein solches Glasrohr einer großen Kälte aussetzt, so bleibt das Wasser noch flüssig, eine Erschütterung aber macht, daß die ganze Wassermasse plötzlich gefriert. Wenn man nun dafür gesorgt hat, daß sich im Inneren der Glasröhre ein Thermometer befindet, dessen Kugel in das Wasser eingetaucht ist, und an welchem man sieht, daß die Temperatur weit unter 0° gesunken ist, so beobachtet man, wie dieses Thermometer in dem Augenblicke, wo das Wasser fest wird, bis auf 0° steigt.

Die Schnelligkeit, mit welcher das Festwerden unter diesen Umständen vor sich geht, und das Steigen des Thermometers sind zwei Phänomene, welche sich leicht erklären lassen. Die latente Wärme der ersten Theilchen, welche gefrieren, geht auf die benachbarten, noch flüssigen Theilchen über. Sie werden zwar erwärmt, aber nicht hinreichend, um ihr Erstarren zu verhindern; daher die doppelte Wirkung des Festwerdens und der Erwärmung.

Wenn das Festwerden bei der gewöhnlichen Erstarrungstemperatur vor sich geht, so geschieht es immer nur langsam und ohne Temperaturerhöhung. Wenn z. B. das Wasser bei 0° gefriert, so beginnt das Erstarren in der Regel gleichzeitig an verschiedenen Punkten, und an diesen Stellen geben die zuerst erstarrenden Theilchen ihre latente Wärme an die benachbarten ab, welche dadurch noch einige Augenblicke flüssig erhalten werden. Deshalb beachtet man dünne Eisblättchen und feine Eisnadeln, welche auf mannigfaltige Weise in der flüssigen Masse gleichsam fortwachsen. Auf diese Weise zerstreut sich die latente Wärme nach und nach; ohne die latente Wärme müßte die ganze flüssige Masse, bis zur Erstarrungstemperatur erkaltet, auf einmal fest werden.

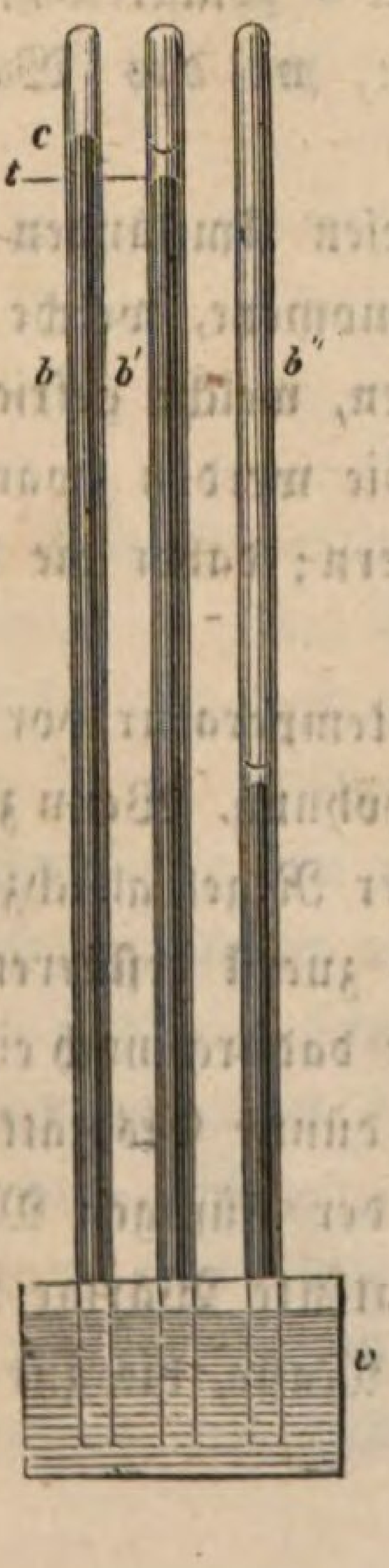
Es wird auch jedesmal Wärme frei, wenn eine Flüssigkeit mit einem anderen Körper eine feste Verbindung eingeht. So verbinden sich der gebrannte Gyps, der gebrannte Kalk mit Wasser zu festen Körpern, welche die Chemiker Hydrate nennen. Das Wasser geht also bei dieser Verbindung in die feste Form über, es muß also Wärme frei werden. Dadurch erklärt sich die starke Erhitzung, welche erfolgt, wenn man gebrannten Kalk mit Wasser übergießt.

229 **Dampfbildung.** Wenn eine Flüssigkeit mit der Luft in Berührung ist, so nimmt ihre Menge mehr und mehr ab, und nach kürzerer oder längerer Zeit verschwindet sie vollständig. Das Wasser, welches nach einem Regen den Boden bedeckt, widersteht nicht dem Wehen eines trockenen Windes und der Einwirkung des Sonnenscheins, es verschwindet, nicht allein weil es in den Boden einsickert, sondern auch weil es in der Luft verdunstet.

Das Phänomen der Verdunstung geht rascher vor sich, wenn man eine Schale mit Wasser über Feuer zum Kochen bringt; in kurzer Zeit ist alles Wasser verschwunden, und doch ist es nicht vom Gefäße verschluckt worden. Es geht daraus hervor, daß die Flüssigkeiten ihren Aggregatzustand ändern, daß sie unsichtbar und expansibel werden wie die Gase. Mit dem Namen Dampf bezeichnet man eine in gasförmigen Zustand übergegangene Flüssigkeit.

Man war lange Zeit der irrigen Meinung, daß die Dämpfe für sich selbst nicht bestehen könnten; man glaubte, sie seyen ganz in derselben Weise in der Luft aufgelöst wie die Salze im Wasser; um eine Flüssigkeit gasförmig zu machen, bedürfe es ebenso eines Auflösungsmittels der Luft, wie ein Lösungsmittel, etwa Wasser, nöthig ist, um die festen Salze flüssig zu machen. Um die Unrichtigkeit dieser Meinung darzuthun und zugleich die wahren Gesetze der Dampfbildung zu studiren, muß man machen, daß die Dampfbildung im luftleeren Raume vor sich geht. Dazu eignet sich nun die Toricelli'sche Leere ganz vorzüglich, nicht allein weil man es mit einem vollkommen luftleeren Raume zu thun hat, sondern auch weil die Depression der beweglichen Quecksilbersäule ein Mittel bietet, die Expansivkraft der Dämpfe zu messen.

Fig. 499.



Nehmen wir an, man habe in einem weiteren, mit Quecksilber gefüllten Gefäße vv' (Fig. 499) drei Toricelli'sche Röhren neben einander gestellt, so wird in allen das Quecksilber gleich hoch stehen; wenn man aber mit Hülfe einer gekrümmten Pipette etwas Wasser in die eine Röhre b' bringt, so steigt es alsbald bis zur Toricelli'schen Leere in die Höhe, und augenblicklich sinkt auch der Gipfel der Quecksilbersäule um einige Millimeter. Dem Gewichte der kleinen Wasserschicht, welche jetzt auf dem Quecksilber schwimmt, kann man diese Depression nicht zuschreiben; hat man, wie es nöthig ist, wenn der Versuch entscheidend seyn soll, Wasser genommen, welches durch

Kochen vollständig von Luft befreit worden ist, so kann man jene Depression auch nicht der aus dem Wasser sich entbindenden Luft zuschreiben. Aus dem Wasser müssen sich also Dämpfe entwickelt haben, welche, wie die Gase, eine Tension haben; denn diese Wasserdämpfe wirken gerade so, als ob man eine kleine Portion Luft in die leere Kammer hätte aufsteigen lassen.

Die Größe der Depression giebt zugleich ein Maß für die Spannkraft der Wasserdämpfe. Nehmen wir an, die durch die Wasserdämpfe deprimirte Quecksilberkuppe *t* stehe um 15 Millimeter tiefer als die Kuppe *c* des ersten Barometers, über welcher sich noch ein vollkommenes Vacuum befindet, so ist klar, daß die Wasserdämpfe auf die Kuppe *t* gerade so stark drücken, wie eine Quecksilbersäule von 15 Millimeter Höhe. Die Depression von 15 Millimeter ist also wirklich das Maß für die Spannkraft des Wasserdampfs.

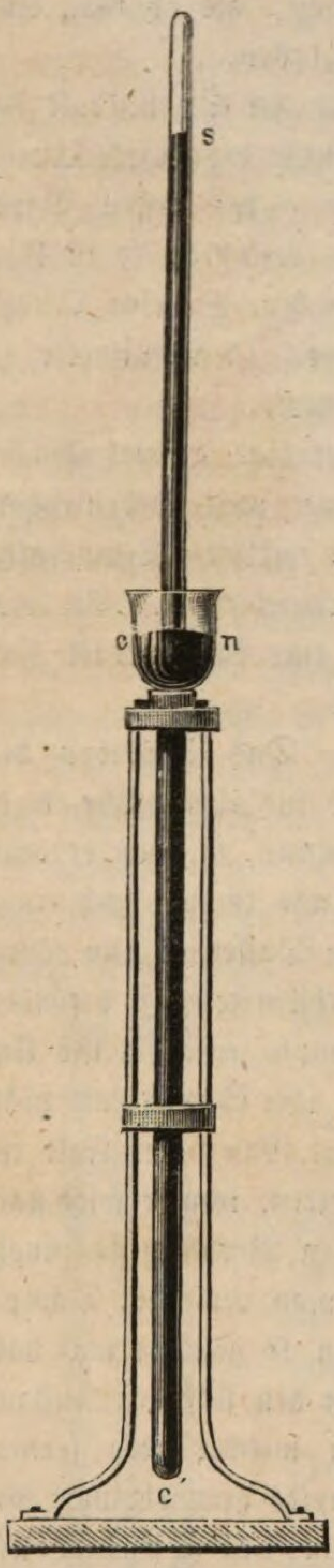
Hätte man in das dritte Barometerrohr *b''* Schwefeläther anstatt Wasser in das Vacuum steigen lassen, so würde man eine weit bedeutendere Depression bemerkt haben als beim Wasser; denn bei einer mittleren Temperatur beträgt die Depression fast die Hälfte der Höhe des Barometers *b*. Es folgt daraus, daß unter diesen Umständen der Aetherdampf eine Spannkraft hat, welche fast dem Drucke einer halben Atmosphäre gleich ist.

Maximum der Spannkraft der Dämpfe. Das Bestreben der 230
Dämpfe, sich auszudehnen, geht, wie bei den Gasen, bis ins Unendliche, d. h. die kleinste Menge Dampf breitet sich in einem leeren Raume, so groß er auch seyn mag, nach allen Seiten aus und übt auf die Wände immer noch einen mehr oder minder großen Druck aus. Die kleinste Menge Wasser ist also fähig, in Dampfgestalt einen Raum von mehreren Hundert Kubikmetern in derselben Weise auszufüllen wie die Luft. Obgleich aber die Dämpfe eine bis ins Unendliche gehende Expansionskraft haben, so kann man doch ihre Spannkraft nicht durch vermehrten Druck beliebig vergrößern, wie dies bei Gasen der Fall ist. Man mag eine gegebene Luftmenge noch so stark comprimiren, immer wird nach dem Mariotte'schen Gesetze ihre Spannkraft in demselben Verhältnisse zunehmen, in welchem ihr Volumen verkleinert wird. Wenn man versucht, Dämpfe zu comprimiren, um dadurch ihre Elasticität zu vergrößern, so gelangt man bald zu einem Punkte, wo sich der Dampf verdichtet und in den flüssigen Zustand zurückkehrt. Diese Gränze des Widerstandes, bei welcher jede fernere Compression keine Vermehrung der Spannkraft des Dampfes hervorbringt, sondern ihn flüssig macht, nennt man nun das Maximum der Spannkraft des Dampfes.

Um diesen charakteristischen Unterschied zwischen Gasen und Dämpfen durch den Versuch nachzuweisen, bedient man sich am zweckmäßigsten des schon auf S. 91 beschriebenen Apparates; nur bringt man nicht Luft in die Barometerröhre, sondern etwas Aether. Man füllt zu diesem Zwecke die Toricelli'sche Röhre sehr sorgfältig mit Quecksilber, so daß alle Luft möglichst entfernt ist, was man am vollständigsten durch Auskochen erreicht. Ist die Röhre so bis auf 1—2 Centimeter mit Quecksilber gefüllt, so gießt man diesen Raum

noch voll Aether, kehrt die Röhre um und taucht sie in das Gefäß *cn* (Fig. 500). Der Aether steigt alsbald in die Höhe, ein Theil bleibt flüssig, ein anderer verdampft im leeren Raume und bewirkt eine bedeutende Depression der Quecksilbersäule. Die Säule *ns* habe z. B. nur noch eine Höhe von 400 Millimeter, während sie 760 Millimeter hoch seyn würde, wenn oben ein Vacuum wäre, so ist die Spannkraft des Aetherdampfes gleich 360 Millimeter. Wenn man nun die Toricelli'sche Röhre tiefer in die mit Quecksilber gefüllte Röhre *cc'* hinabdrückt, um dadurch den mit Aetherdampf gefüllten Raum zu verkleinern, so beobachtet man, daß die Höhe der Quecksilbersäule *ns* ganz unverändert bleibt. Wäre statt des Aetherdampfes Luft im oberen Theile der Röhre gewesen, so wissen wir, daß, wenn beim Niederdrücken das Volumen der abgesperrten Luft verkleinert wird, auch ihre Elasticität zunimmt, so daß die Höhe der Quecksilbersäule im Barometerrohre abnimmt (S. 91). Hier beim Dampf ist die Sache ganz anders, das Volumen des Aetherdampfes wird vermindert, ohne daß seine Elasticität zunimmt, denn die Höhe der Säule *ns* bleibt ja dieselbe. Je mehr man aber niederdrückt, desto mehr nimmt die Menge des flüssigen Aethers zu, die Verkleinerung des mit Aetherdämpfen erfüllten Raumes bewirkt also, daß sich ein Theil der Dämpfe wieder zu flüssigem Aether condensirt, während die übrigen Dämpfe ihre Spannkraft nicht ändern. Wenn man also den mit Aetherdampf gefüllten Raum auf ½, ⅓, ¼ u. s. w. comprimirt, so wird auch ½, ⅓, ¼ u. s. w. des Dampfes condensirt. Fährt man fort, das Rohr niederzudrücken, so gelangt man bald zu einem Punkte, wo aller Dampf verdichtet ist, so daß sich nur noch flüssiger Aether über der Quecksilbersäule befindet; dieses völlige Verschwinden der Dampfblase ist jedoch schwer zu erreichen, weil der Aether immer etwas absorbirte Luft enthält.

Fig. 500.



Hebt man die Röhre wieder, so behält die Quecksilbersäule immer noch dieselbe Höhe *ns*, während die flüssige Aetherschicht fortwährend abnimmt, was beweist, daß sich sogleich wieder Dampf bildet, um den vergrößerten Raum auszufüllen und in demselben das Maximum der Spannkraft zu erreichen. Wenn man aber nur wenig Aether in die Röhre bringt und sie hinlänglich hebt, daß alle Flüssigkeit vollständig verschwindet, so wird nun bei fernerem Heben auch die Quecksilbersäule steigen; der Aetherdampf ist also nicht mehr im Maximum

der Spannkraft, er verhält sich bei fernerer Vergrößerung seines Volumens gerade so wie ein Gas.

Gleichgewicht der Spannkraft in einem ungleich erwärmten Raume. 231 Man überzeugt sich leicht, welch bedeutenden Einfluß die Temperatur auf das Maximum der Tension der Dämpfe ausübt; denn wenn man die eben erwähnten Versuche bei verschiedenen Temperaturen anstellt, so wird die Depression der Barometersäule sehr ungleich ausfallen. Bei 0° erhält man z. B. mit Aether nur eine Depression von 180 Millimeter, während sie bei 30 Grad 630 Millimeter beträgt. Phänomene, welche wir immer vor Augen haben, geben uns auch hinlängliche Beweise von dieser Wahrheit. Der Wasserdampf, wie er sich an der Oberfläche der Flüsse und Seen bildet, hat nur eine geringe Spannkraft; wenn das Wasser kocht, ist die Spannkraft der Dämpfe schon so groß, daß sie dem Drucke der Atmosphäre das Gleichgewicht halten kann, und bei noch höheren Temperaturen wächst diese Tension dermaßen, daß sie die furchtbarsten Explosionen von Dampfkesseln bewirkt. Man kann demnach fragen, welches wohl das Maximum der Tension des Dampfes in einem Raume seyn wird, welcher an verschiedenen Stellen ungleich erwärmt ist. Nach den Bedingungen des Gleichgewichts gasförmiger Körper muß an allen Stellen dieses Raumes der Dampf gleiche Tension haben, und da an den kälteren Stellen die Spannkraft des Dampfes nicht so groß seyn kann als an den wärmeren, so ist klar, daß im ganzen Raume die Tension der Dämpfe dieselbe seyn muß wie an der kältesten Stelle, daß also an den wärmeren Stellen der Dampf nicht das Maximum der Spannkraft erreichen kann, welches dieser höheren Temperatur zukommt.

Dies Princip läßt sich mit Hülfe des Apparates Fig. 501 anschaulich machen. Zwei Glaskölbchen *a* und *b*, welche beide etwas Aether enthalten, sind durch eine Röhre *c* verbunden; durch den Kork, welcher *b* verschließt, geht eine zweite abwärts gebogene Röhre *d*. Wenn man den Aether in *a* und *b* ins Kochen bringt (es geschieht dies am besten dadurch, daß man sie in heißes Wasser taucht), so entweichen die Dämpfe durch die Röhre *d* und nehmen die Luft aus dem Apparate mit fort. Nun taucht man das untere Ende der Röhre *d* in ein Gefäß mit Quecksilber und entfernt die Wärmequellen, welche den Aether ins Kochen gebracht hatten. Alsbald wird *a* und *b* bis auf die Temperatur der umgebenden Luft erkaltet seyn, die Spannkraft der Dämpfe im Apparate nimmt dabei bis zu einer bestimmten Grenze ab, und das Quecksilber steigt demnach in der Röhre *d* bis zu einer bestimmten Höhe, welche von der Tempe-

Fig. 501.

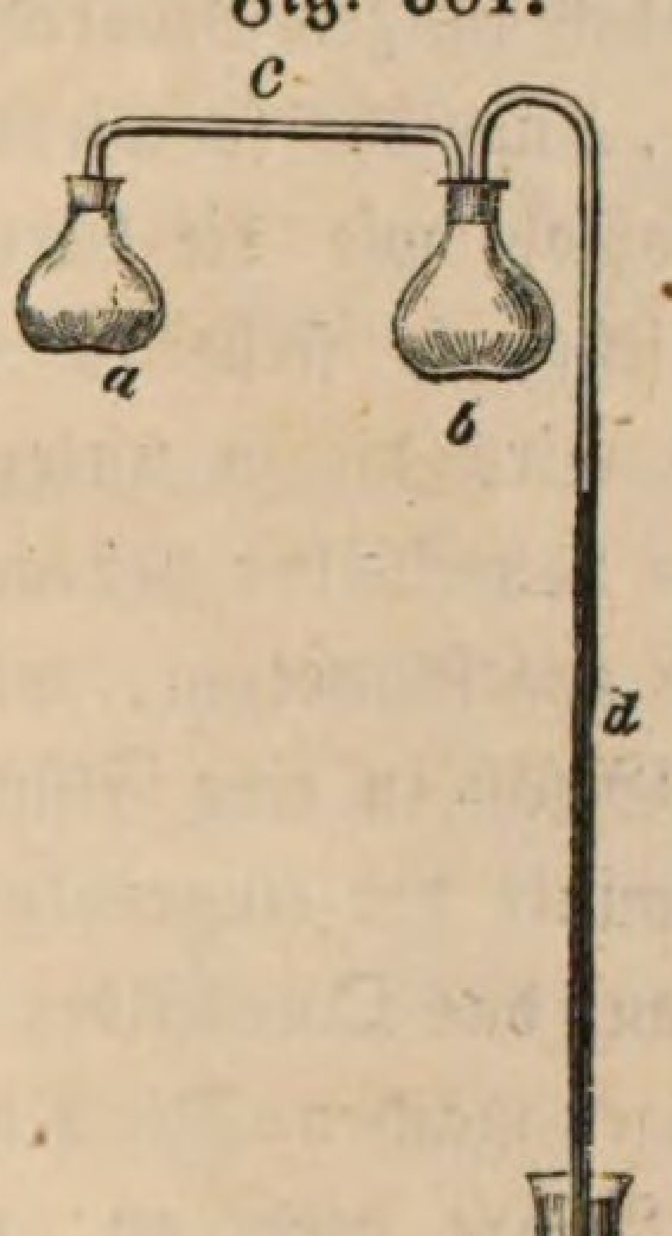
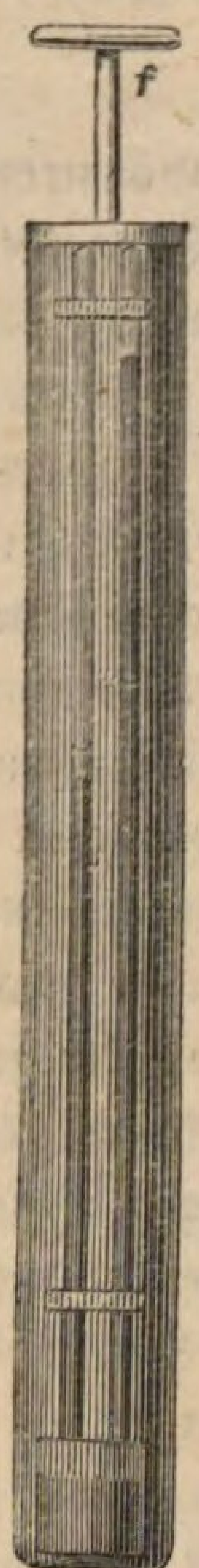


Fig. 502.



ratur der umgebenden Luft abhängt. Taucht man nun die eine Kugel in Schnee oder eine Kältemischung, so steigt das Quecksilber alsbald eben so hoch, als ob beide Kugeln dieselbe Erkaltung erfahren hätten.

Darauf gründet sich die Anwendung des **Condensators** bei Dampfmaschinen, den wir später werden kennen lernen.

232 **Messung der Spannkraft der Wasserdämpfe.** Um die Spannkraft des Wasserdampfes zu bestimmen, hat man verschiedenartige Apparate anzuwenden, je nachdem man sie für eine Temperatur zwischen 0° und 100° oder über 100° ermitteln will.

Zwischen 0° und 100° wendet man den Fig. 502 abgebildeten Apparat an. Er besteht aus zwei Barometerröhren, welche neben einander in dasselbe Gefäß eingetaucht sind; die erste dieser Röhren bildet ein vollständiges Barometer, in der zweiten befindet sich über dem Quecksilber etwas Wasser, welches zum Theil im leeren Raume verdampft. Diese beiden Röhren werden mittelst eines Eisenstabes in ein hinlänglich tiefes Glasgefäß eingesenkt. Dieses Gefäß ist ganz mit Wasser gefüllt, welches man bis zu jeder beliebigen Temperatur zwischen 0° und 100° erwärmen kann. Die Temperatur dieses Wassers, welches durch zweckmäßig angebrachte Thermometer bestimmt wird, ist zugleich die der beiden Barometer und des Wasserdampfes in dem einen. Um die Elasticität des Wasserdampfes zu erhalten, welche jedem Temperaturgrade entspricht, hat man nur zu bestimmen, in welchem Verhältnisse die Depression des Dampfbarometers zur Höhe der Quecksilbersäule im vollständigen Barometer steht.

Fig. 503.



Um die Spannkraft der Dämpfe über 100° zu messen, läßt sich folgendes Verfahren anwenden. An einer ziemlich langen Glasröhre, Fig. 503, ist ein weiteres Gefäß angeschmolzen, ungefähr so wie das Gefäß eines Barometers; die längere Röhre sowohl wie die kürzere sind oben offen. Wenn man Quecksilber eingießt, so stellt es sich natürlich in beiden Röhren gleich hoch. Nun wird die zu untersuchende Flüssigkeit in das weitere Gefäß auf das Quecksilber gebracht, dann einige Zeit lang im Kochen erhalten und zugeschmolzen, wenn alle Luft ausgetrieben ist. Bringt man das Gefäß in eine Flüssigkeit, deren Temperatur höher ist als der Siedepunkt der eingeschlossenen Flüssigkeit, so bilden sich Dämpfe, welche auf das Quecksilber im Gefäße drücken und es in der längeren Röhre steigen machen. Die Differenz der Quecksilberspiegel im Gefäße und der Röhre giebt an, wie viel die Spannkraft der Dämpfe größer ist als ein Atmosphärendruck. Um die Röhre vor dem Zerbrechen zu schützen und um zugleich die Höhe der gehobenen Quecksilbersäule messen zu können, ist der Apparat auf einem getheilten Stabe befestigt. Wenn die Röhre lang genug ist, kann man mit die-

ser Vorrichtung die Tension der Wasserdämpfe bis zu 3 und 4 Atmosphären messen.

Um stärkere Spannkräfte zu messen, braucht man nur die Steigröhre zuzuschmelzen, so daß in ihr ein bestimmtes Luftquantum abgesperrt ist. Wenn die Dämpfe im Gefäße das Quecksilber in die Röhre treiben, so wird die abgesperrte Luft comprimirt, und man kann leicht aus der Höhendifferenz der beiden Quecksilberspiegel die Spannkraft des Dampfes berechnen.

Die folgenden Tabellen enthalten das Maximum der Spannkraft der Wasserdämpfe für verschiedene Temperaturen:

Grade.	Spannkraft des Wasserdampfes in Millimetern.	Druck auf 1 Quadratcentimeter in Kilogrammen.	Druck auf 1 Quadratzoll preuß. in Pfunden.
0	5	0,007	0,101
10	9	0,013	0,189
20	17	0,023	0,344
30	30	0,042	0,611
40	53	0,072	1,053
50	89	0,126	1,763
60	145	0,196	2,874
70	229	0,311	4,552
80	352	0,478	6,996
90	525	0,714	10,437
100	760	1,033	15,101

Spannkraft in Atmosphären.	Entsprechende Temperaturen.	Druck auf 1 Quadratcentimeter in Kilogrammen.	Druck auf 1 Quadratzoll preuß. in Pfunden.
1	100	1,03	15,1
2	121	2,07	30,2
4	145	4,83	60,4
6	160	6,20	90,6
8	172	8,26	120,9
10	182	10,33	151,1
15	200	15,49	226,6
20	215	20,66	302,2
25	226	25,82	377,7
30	236	30,99	453,2

Man sieht aus diesen Tabellen, daß für die Temperatur des Siedepunktes die Spannkraft des Wasserdampfes dem Drucke der Atmosphäre das Gleichgewicht hält; dies ist ganz allgemein wahr; die Spannkraft des Dampfes, welcher sich aus irgend einer kochenden Flüssigkeit bildet, ist immer dem Drucke gleich, welcher auf der Oberfläche der Flüssigkeit lastet; denn wenn sie geringer wäre, so könnte der Dampf nicht in Gestalt von Blasen im Inneren der Flüssigkeit bestehen; und wenn sie stärker wäre, so müßte sich der Dampf schon früher gebildet haben. Für den Siedepunkt haben die Dämpfe aller Flüssigkeiten gleiche Spannkraft. Dalton glaubte, daß in gleichem Temperaturabstand von ihrem Siedepunkte die Spannkräfte der Dämpfe aller Flüssigkeiten gleich seyen. Nach dem Dalton'schen Gesetze wäre es also nur nöthig, die Tafel für die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes zu haben und den Siedepunkt einer Flüssigkeit zu kennen, um die Spannkraft ihrer Dämpfe für alle Temperaturen zu ermitteln. Der Siedepunkt des Alkohols z. B. ist 78°; die Spannkraft des Alkoholdampfes bei 113°, also 35° über dem Siedepunkte, müßte der Spannkraft des Wasserdampfes bei 135° gleich seyn, welche 3 Atmosphären ist. Nach diesem Gesetze wäre die Spannkraft des gesättigten Alkoholdampfes bei 0° gleich 19 Millimeter, weil dies die Spannkraft des Wasserdampfes bei einer Temperatur ist, welche 78° unter dem Siedepunkte des Wassers liegt. Aus den Versuchen mehrerer Physiker geht jedoch hervor, daß dies Gesetz nicht genau ist.

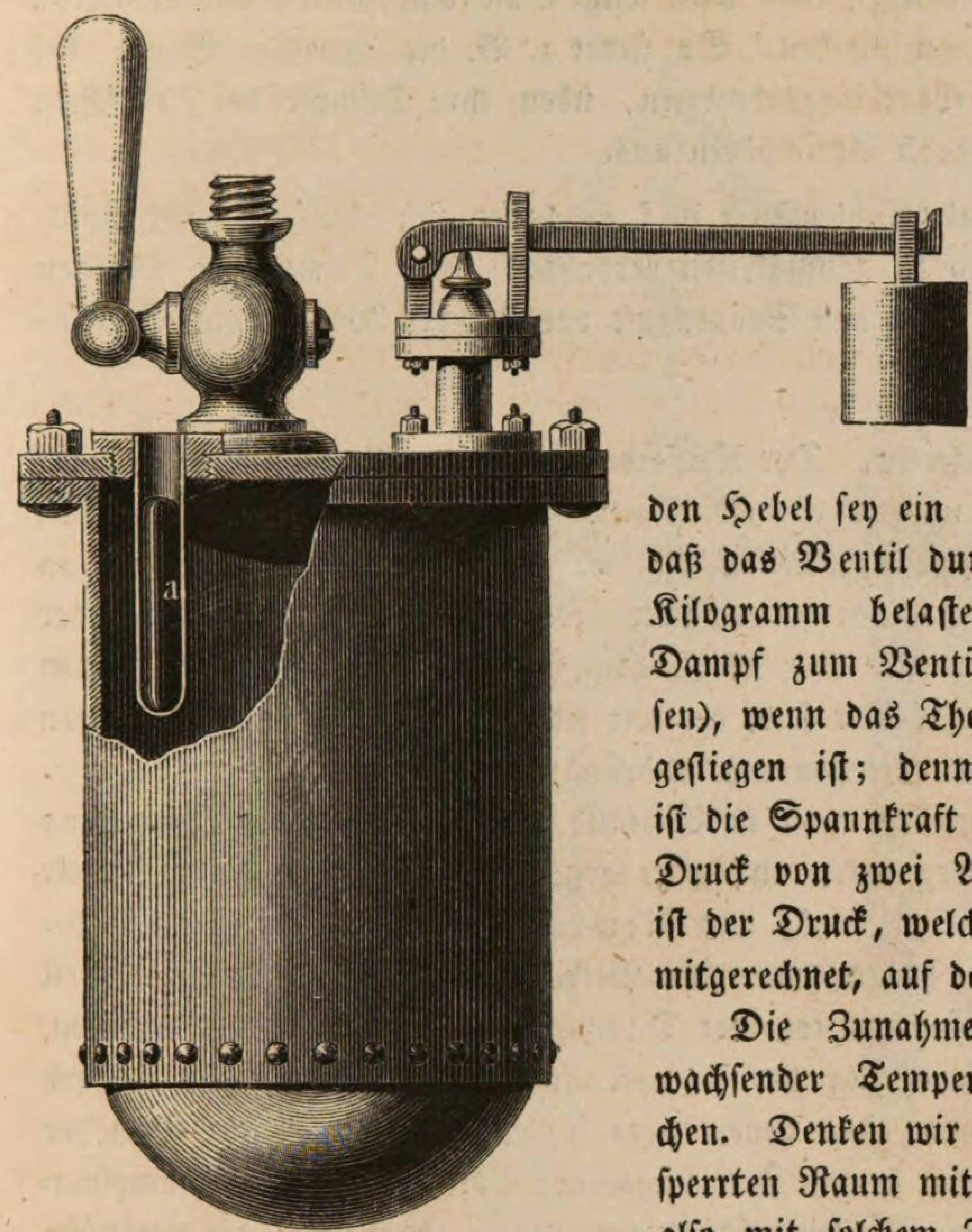
Die Spannkraft des Dampfes wächst, wie man sieht, in einem weit rascheren Verhältnisse als die Temperatur, d. h. bei höheren Temperaturen bringt eine bestimmte Temperaturerhöhung eine weit größere Vermehrung der Spannkraft hervor als bei niedrigen; während eine Temperaturerhöhung von 100 bis 121°, also um 21°, die Spannkraft des Wasserdampfes um 1 Atmosphäre vermehrt, wächst sie bei einer Temperaturerhöhung von 226 bis 236°, also bei einer Temperaturerhöhung von nur 10 Graden, schon um 5 Atmosphären, zwischen 226 und 236° reicht also ungefähr eine Temperaturerhöhung von 2° schon hin, um die Spannkraft des Wasserdampfes um 1 Atmosphäre zu steigern.

Wie mit steigender Temperatur die Spannkraft der Dämpfe wächst, läßt sich auch mit Hülfe eines kleinen Dampfkessels, Fig. 504, zeigen. In dem fest aufgeschraubten Deckel befinden sich drei Oeffnungen; auf der einen ist ein Sicherheitsventil von der bereits auf Seite 27 betrachteten Einrichtung angebracht; in die zweite Oeffnung ist ein in den Kessel hineinragendes Röhrchen *a* von Eisenblech aufgeschraubt, welches zum Theil mit Quecksilber gefüllt wird. Auf der dritten Oeffnung endlich sitzt ein kurzes Rohr, welches durch einen Hahn verschlossen werden kann und auf welches man verschiedene Ausströmungsöffnungen aufschrauben kann.

Wird der bis zu $^2/_3$ seiner Höhe mit Wasser gefüllte Kessel genügend erhitzt, so kommt das Wasser nach einiger Zeit ins Kochen, wenn der Hahn geöffnet ist; ein in das Quecksilber des Rohres *a* eingetauchtes Thermometer zeigt constant die Temperatur des Siedepunktes. Sobald man aber den Hahn

schließt, also das Abziehen der Dämpfe hindert, steigt sogleich das Thermometer,

Fig. 504.



und die Spannkraft der Dämpfe im Kessel wächst, bis sie endlich groß genug ist, um das Sicherheitsventil zu heben und hier einen Ausweg zu erzwingen.

Gesetzt, der Querschnitt der Ventilfläche betrage ein Quadratcentimeter und an den Hebel sey ein Gewicht so angehängt, daß das Ventil durch ein Gewicht von 1 Kilogramm belastet ist, so wird der Dampf zum Ventil herausblasen (abblasen), wenn das Thermometer auf 121° C. gestiegen ist; denn bei dieser Temperatur ist die Spannkraft des Dampfes gleich dem Druck von zwei Atmosphären, und dies ist der Druck, welcher, den Luftdruck selbst mitgerechnet, auf dem Ventil lastet.

Die Zunahme der Spannkraft bei wachsender Temperatur hat zwei Ursachen. Denken wir uns irgend einen abgesperrten Raum mit Wasserdampf von 100°, also mit solchem Dampfe erfüllt, dessen Spannkraft 1 Atmosphäre beträgt; in diesem Raume sey ganz und gar kein Wasser mehr vorhanden, er sey ganz vom Wasser abgesperrt. Wird nun die Temperatur dieses Raumes auf 121° erhöht, so strebt sich der in ihm enthaltene Dampf allerdings auszudehnen, und weil er sich nicht ausdehnen kann, wird seine Spannkraft wachsen, aber nicht viel; der Dampf ist nun nicht mehr gesättigt, er verhält sich ganz wie ein Gas. Wenn sich aber noch Wasser in diesem Raume befindet, so wird sich in Folge der Temperaturerhöhung eine neue Quantität Dampf bilden; die Zunahme der Spannkraft um 1 Atmosphäre rührt also vorzugsweise daher, daß der Dampf dichter wird und in Folge seiner größeren Dichtigkeit einen größeren Druck ausübt.

1 Kubikzoll Wasser liefert:

1700	Kubikzoll	gesättigten	Wasserdampf	von	100°
897	»	»	»	»	121
207	»	»	»	»	182.

Es giebt Flüssigkeiten, deren Siedepunkt unter der mittleren Lufttemperatur

liegt; solche Körper können natürlich unter gewöhnlichen Umständen nicht tropfbar flüssig seyn, sie sind bei der gewöhnlichen Lufttemperatur unter dem gewöhnlichen Luftdrucke nur gasförmig; man muß solche Gase comprimiren und erkalten, um sie tropfbar flüssig zu machen. So siedet z. B. die schweflige Säure bei — 10°; in einer Glasröhre eingeschmolzen, üben ihre Dämpfe bei 25° schon einen Druck von ungefähr 5 Atmospären aus.

Cyangas, Ammoniak, Kohlensäure u. s. w. lassen sich ebenfalls durch Compressionen und Erkaltung zu Flüssigkeiten verdichten. Der Dampf der flüssigen Kohlensäure hat bei 0° schon eine Spannkraft von 36, bei 30° schon eine Spannkraft von 73 Atmosphären.

233 **Die Dampfmaschine.** Der Wasserdampf gehört zu den mächtigsten bewegenden Kräften, die uns zu Gebote stehen. Es unterliegt keinem Zweifel, daß der ungeheure Aufschwung, dessen sich die Industrie und der Verkehr in den neuesten Zeiten zu erfreuen haben, zum großen Theil der Anwendung der Dampfkraft zu verdanken ist. Der Wasserdampf liefert uns eine Kraft, deren wir aufs Vollkommenste Meister sind, der wir jede beliebige Stärke geben können und die sich leicht überall erzeugen und anbringen läßt.

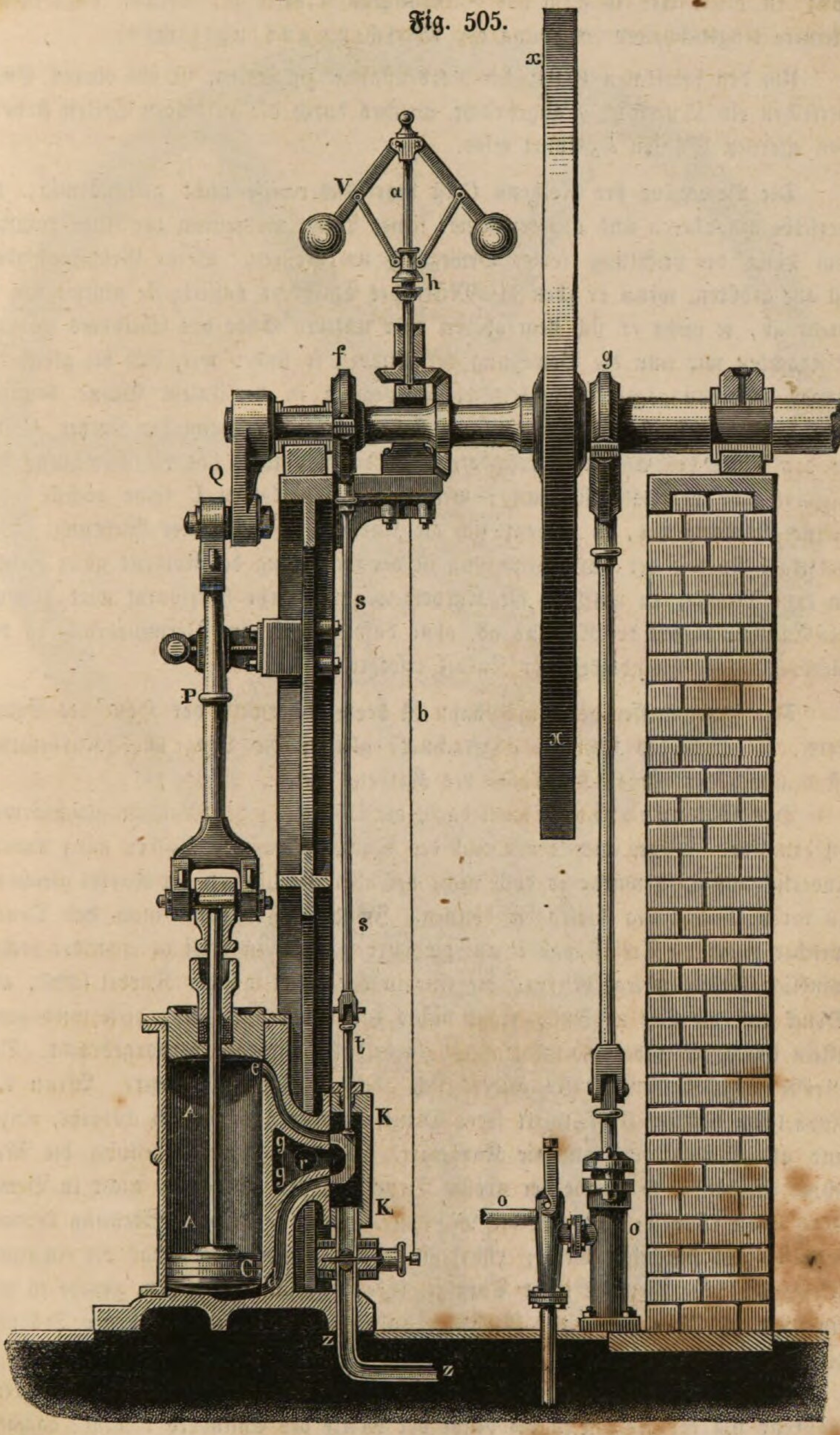
Schon seit 1788 wendete man in England die Dampfkraft zur Förderung der Grubenwasser in Bergwerken an; aber abgesehen, daß die zu diesem Zwecke verwendeten Maschinen Savary's und Newkomen's doch nur eine sehr beschränkte Anwendbarkeit haben, war ihr Betrieb auch sehr kostspielig. Erst Watt gelang es, die Construction der Dampfmaschine so zu vervollkommnen, daß eine allgemeinere Benutzung der Dampfkraft möglich wurde, und dadurch wurde Watt der Gründer einer neuen Aera für die Industrie. Der Bau der Dampfmaschine machte in kurzer Zeit ungeheure Fortschritte. Die Dampfmaschine ist in der That eine Mustermaschine geworden, an welcher die praktische Mechanik eine tüchtige Schule durchgemacht hat.

Wir wollen die Dampfmaschine zunächst in ihrer einfachsten Form kennen lernen. Fig. 505 stellt eine Hochdruckdampfmaschine im Durchschnitt, Fig. 506 stellt von derselben Maschine eine vordere Ansicht dar. Durch das Rohr z gelangt der Dampf aus dem Dampfkessel zunächst in den Dampfraum *K*, von welchem aus zwei Kanäle zum Cylinder *A* führen; der eine mündet am oberen Ende des Cylinders bei *e*, der andere am unteren Ende bei *d*. Durch den Vertheilungsschieber, den wir alsbald näher betrachten wollen, wird bewirkt, daß der Dampf abwechselnd unten und dann wieder oben in den Cylinder einströmt und den Kolben *C* abwechselnd auf und nieder treibt.

Die Kolbenstange bewegt sich luft- und dampfdicht durch eine Stopfbüchse, welche sich in der Mitte des oberen Cylinderdeckels befindet.

An der Kolbenstange ist zunächst die Pleuelstange (Treibstange) *P* befestigt, welche durch Vermittelung der Kurbel *Q* die alternirende Bewegung des Kolbens in eine gleichförmige Rotationsbewegung verwandelt. Die Axe der Kurbel *Q* ist die Hauptaxe der Maschine, welche in Bewegung gesetzt werden

Fig. 505.



soll; an dieser Axe ist auch das Schwungrad X befestigt, welches dazu dient, kleinere Ungleichheiten im Gang der Maschine auszugleichen.

Um den vertikalen Gang der Kolbenstange zu sichern, ist am oberen Ende derselben ein Querstück q angebracht, welches durch die zu beiden Seiten stehenden eisernen Säulen l geführt wird.

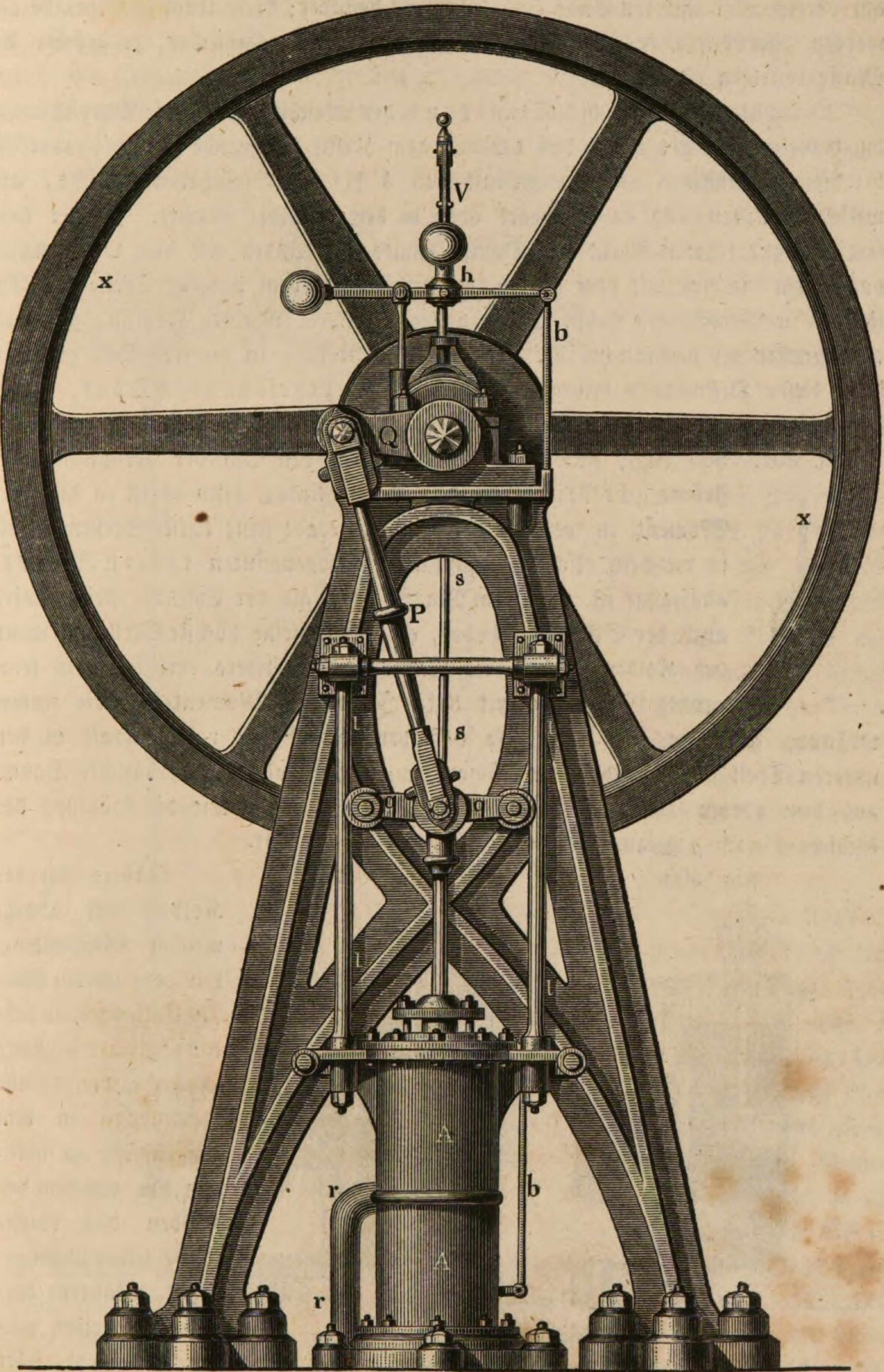
Die Bewegung des Kolbens C ist begreiflicherweise nicht gleichförmig, da derselbe am oberen und unteren Ende seiner Bahn momentan zur Ruhe kommt, um dann die Richtung seiner Bewegung umzukehren. Seine Geschwindigkeit ist am größten, wenn er eben die Mitte des Cylinders passirt; sie nimmt um so mehr ab, je mehr er sich dem oberen oder unteren Ende des Cylinders nähert. Betrachten wir nun die Bewegung der Kurbel, so finden wir, daß bei gleichförmiger Umdrehungsgeschwindigkeit die Bewegung in vertikalem Sinne dennoch sehr veränderlich ist. Der Kurbelarm steht wagerecht, wenn der Kolben C sich in der Mitte des Cylinders befindet, in diesem Momente hat die Bewegung der Kurbel eine vertikale Richtung; wenn aber der Kolben C seine höchste oder tiefste Stellung hat, so bewegt sich die Kurbel in horizontaler Richtung. Der vertikale Antheil der Kurbelbewegung ist der Bewegung des Kolbens ganz gleich; in dem Maaße, in welchem die Kurbelbewegung mehr horizontal wird, nimmt die Geschwindigkeit des Kolbens ab, ohne daß dadurch eine Verminderung in der Umdrehungsgeschwindigkeit der Kurbel erfolgte.

Der Durchmesser der Kurbelbahn ist begreiflicherweise der Höhe des Cylinders, die Dicke des Kolbens abgerechnet, gleich; die Länge des Kurbelarms ist demnach der halben Hubshöhe des Kolbens gleich.

Das Schwungrad X dient dazu, die Bewegung der Maschine gleichförmig zu erhalten. Wenn auch der Druck des Dampfes auf den Kolben ganz unveränderlich wäre, so würde er doch nicht bei allen Stellungen der Kurbel gleichviel zu deren Umdrehung beitragen können. In der That kann man den Druck, welcher durch die Treibstange P auf die Kurbel wirkt, in zwei zu einander rechtwinklige Kräfte zerlegt denken; die eine in der Richtung der Kurbel selbst, als Druck auf die Axe wirkend, trägt nichts zur Umdrehung bei; diese wird ganz allein durch die andere tangential zur Kurbelbahn wirkende hervorgebracht. Die Größe dieser beiden Kräfte ändert sich aber in jedem Momente. Wenn der Kurbelarm vertikal steht, wirkt jeder Druck, welcher vom Kolben ausgeht, einzig und allein als Druck auf die Kurbelaxe. Wenn in dieser Stellung die Maschine stillstände, so würde der größte Druck auf den Kolben sie nicht in Bewegung setzen können; daß also die Maschine, indem sie in diese Stellung kommt, nicht absolut stillstehen bleibt, rührt einzig und allein daher, daß die einzelnen Maschinentheile vermöge ihrer Trägheit ihre Bewegung fortsetzen, gerade so wie ein Pendel, wenn es in der Ruhelage ankommt, doch vermöge seiner Trägheit die Bewegung fortsetzt.

Ueberhaupt wird der Lauf der Maschine eine Beschleunigung erfahren, während sich der Kolben in die Nähe der Mitte des Cylinders bewegt; dagegen

Fig 506.



eine Verzögerung im Laufe der Maschine eintritt, wenn sich der Kolben nahe am oberen oder unteren Ende des Cylinders befindet; diese Ungleichförmigkeiten werden aber durch das Schwungrad um so mehr ausgeglichen, je größer die Masse desselben ist.

Betrachten wir nun die Steuerung der Maschine, d. h. die Vorrichtung, durch welche bewirkt wird, daß der aus dem Kessel kommende Dampf, welcher bei diesen Maschinen eine Spannkraft von 4 bis 6 Atmosphären erreicht, abwechselnd unten und dann wieder oben in den Cylinder eintritt. In der dem Cylinder zugekehrten Wand des Dampfraumes *K* befinden sich drei Oeffnungen, von denen die eine mit dem oberen, die andere mit dem unteren Theile des Cylinders in Verbindung steht, während die mittlere zu einer Höhlung *g* führt, aus welcher der verbrauchte Dampf durch das Rohr *r* in die freie Luft gelangt. Vor diesen Oeffnungen bewegt sich nun der Vertheilungsschieber, dessen Einrichtung aus Fig. 507 näher zu ersehen ist. In der Stellung, wie sie Fig. 505 zeigt, sind beide Kanäle durch den Schieber verschlossen, es strömt gar kein Dampf in den Cylinder, denn es ist ja dies der Moment, in welchem der Kolben gerade seine tiefste Stellung hat, in welchem also die Maschine im sogenannten todten Punkte angelangt ist. In dem Maaße aber, als der Cylinder steigt, wird auch der Schieber gehoben, er erreicht seine höchste Stellung, wenn der Kolben gerade die Mitte des Cylinders erreicht, also seine größte Geschwindigkeit hat. In diesem Momente ist die untere Oeffnung ganz frei, Fig. 508, so daß der Dampf mit voller Kraft in den unteren Theil des Cylinders einströmen kann, während der verbrauchte Dampf aus dem oberen Theil des Cylinders durch den Kanal *e* und die Höhlung des Schiebers nach *g* gelangt und von da durch *r* entweicht.

Fig. 507.

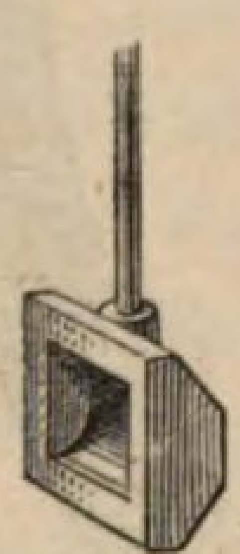


Fig. 508.

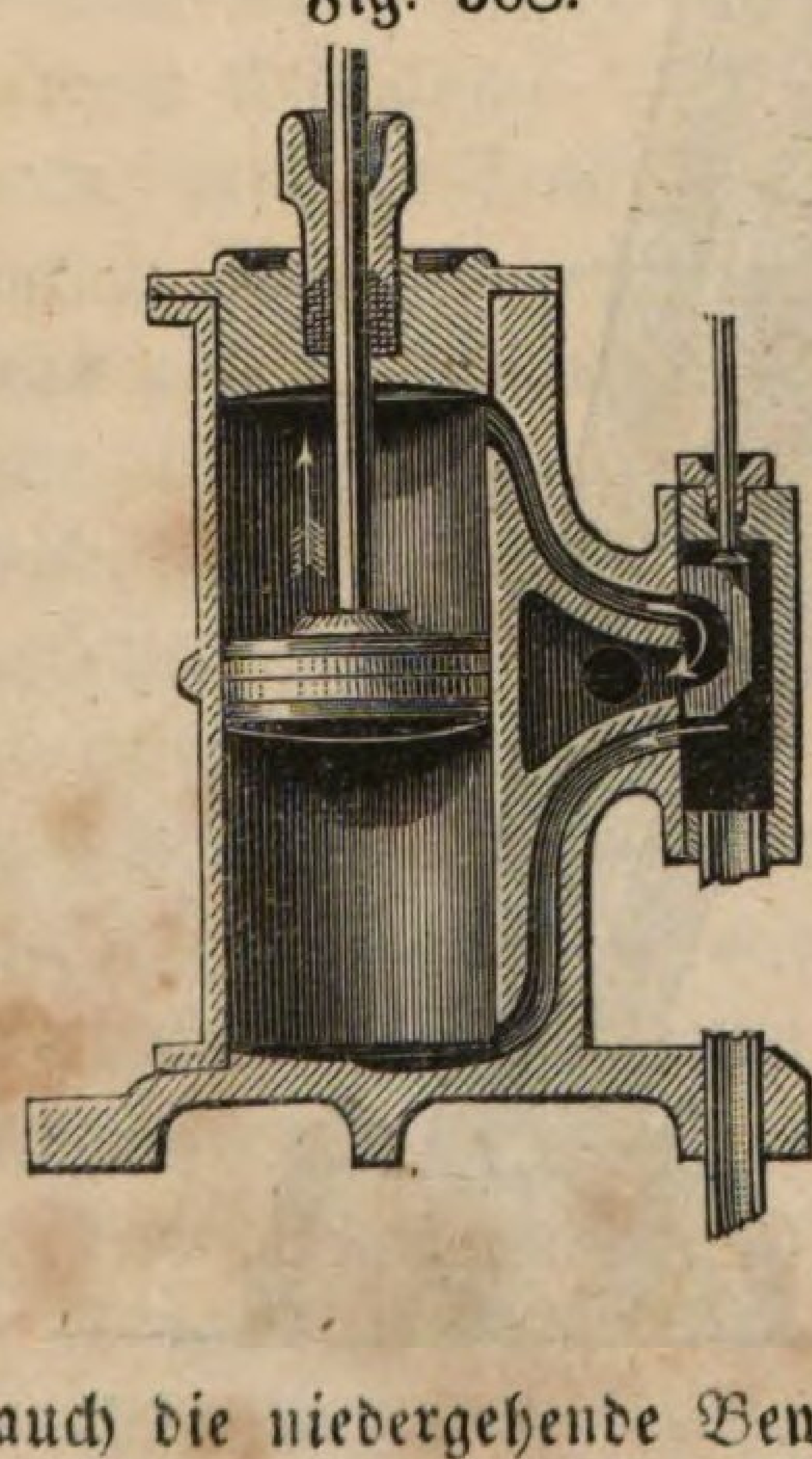
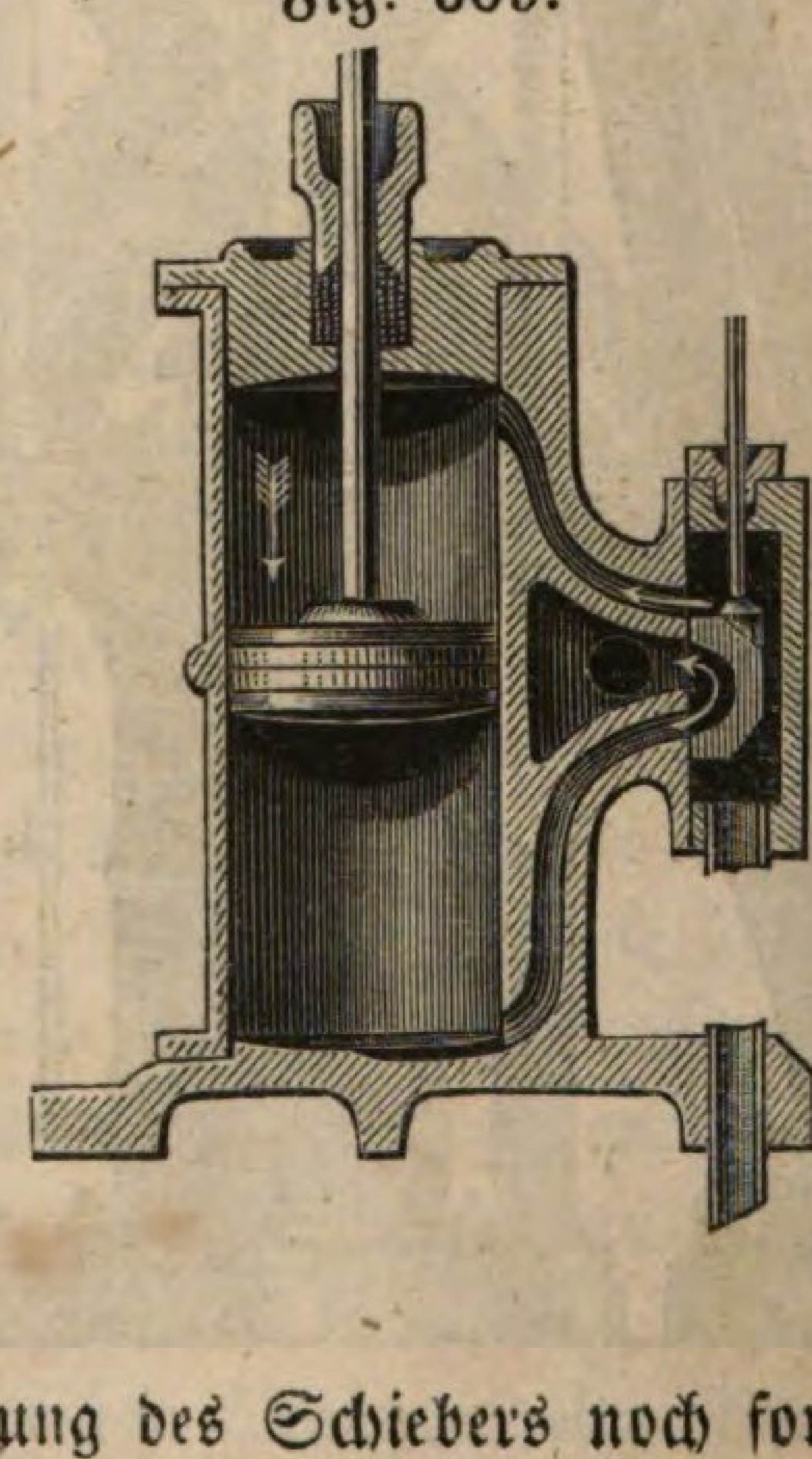


Fig. 509.



Nähert sich der Kolben mit abnehmender Geschwindigkeit dem oberen Ende des Cylinders, so geht der Schieber allmälig wieder nieder, um alle Oeffnungen in dem Augenblicke zu schließen, in welchem der Kolben das oberste Ende seiner Bahn erreicht. Während darauf der Kolben wieder niedergeht, fährt auch die niedergehende Bewegung des Schiebers noch fort, bis der Kolben wieder in der Mitte des Cylinders angekommen ist, wo dann die obere Oeffnung

ganz frei ist, Fig. 509, und der Dampf aus der unteren Hälfte des Cylinders durch die Höhlung des Schiebers entweicht.

Die eben betrachtete Bewegung des Vertheilungsschiebers muß natürlich durch die Maschine selbst bewerkstelligt werden, und zwar geschieht dies durch die excentrische Scheibe *f*, die wir in Fig. 505 von der Seite sehen. Fig. 510, 511 und 512 zeigen dieselbe von vorn gesehen in drei Hauptstellungen.

Fig. 510.

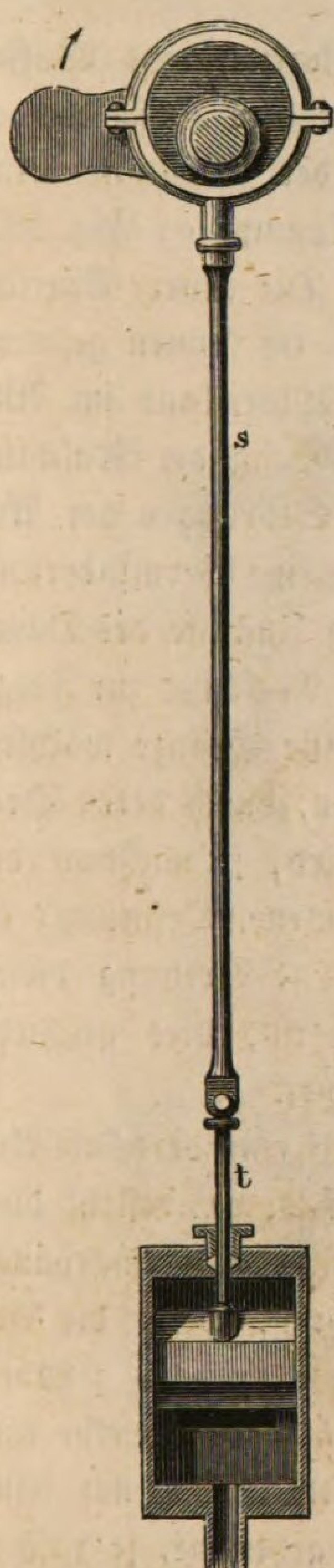


Fig. 511.

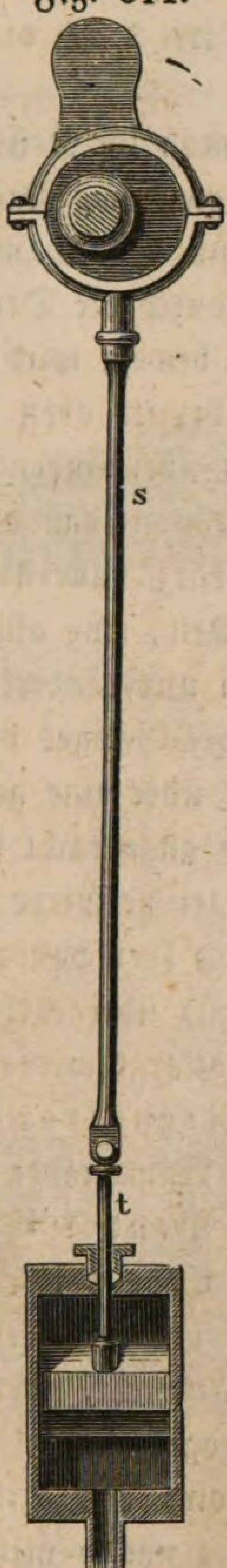
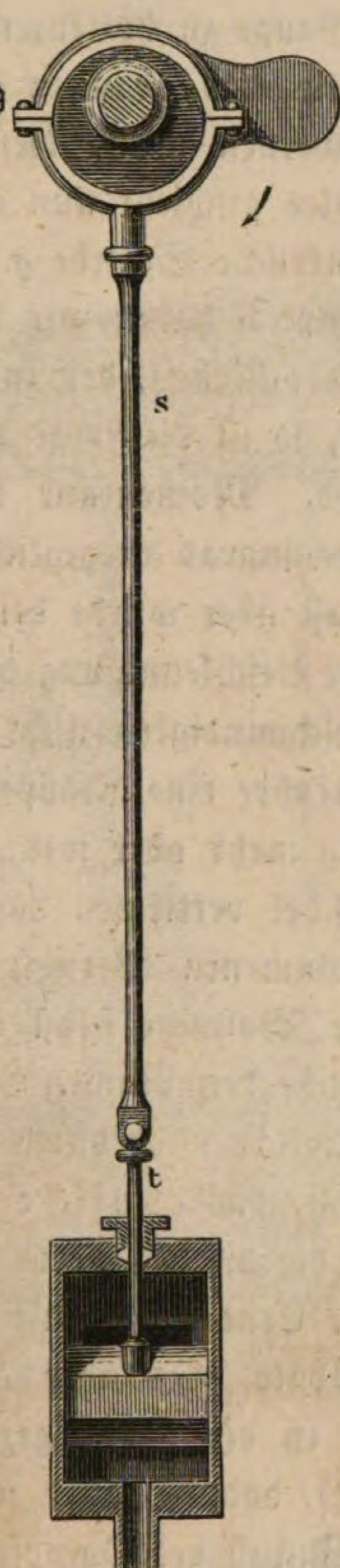


Fig. 512.



Die excentrische Scheibe ist eine kreisförmige Scheibe, die an der Hauptaxe der Maschine befestigt ist, deren Mittelpunkt aber nicht mit dem Mittelpunkt der Axe zusammenfällt, so daß bei jeder Umdrehung der Axe der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe einen kleinen Kreis zu beschreiben hat, dessen Durchmesser der Bahn gleich ist, welche der Schieber bei seiner auf- und niedergehenden Bewegung zurücklegt.

Um den Umfang dieser Scheibe ist ein Ring gelegt, an welchem die Stange *s* befestigt ist; an der Stange *s* hängt nun wieder mittelst eines Gelenkes die Schieberstange *t*, und so ist klar, wie der Schieber aufwärts gezogen wird, während der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe durch die Umdrehung der Axe aus seiner tiefsten in seine höchste Stellung gelangt, während umgekehrt der Schieber niedergedrückt wird, während der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe auf der anderen Hälfte seiner Bahn niedergeht.

Da der Dampf unten voll einströmen muß, wenn der Kolben in aufgehender Bewegung die Mitte des Cylinders passirt, so muß der Mittelpunkt der

excentrischen Scheibe seinen höchsten Punkt einnehmen, wenn der Kurbelarm eben wagerecht steht, Fig. 510. Gelangt der Kurbelarm in seine höchste Stellung, so daß er vertikal nach oben gerichtet ist, so steht jetzt der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe in gleicher Höhe mit dem Mittelpunkt der Axe, der Schieber befindet sich gerade in der Mitte seiner Bahn und verschließt alle Oeffnungen, Fig. 511. Wenn der Kolben, nach unten gehend, die Mitte des Cylinders passirt, so steht die Kurbel wieder wagerecht und die excentrische Scheibe nimmt ihre tiefste Stellung ein, damit der Dampf frei durch die obere Oeffnung einströmen könne, Fig. 512.

Um die Maschine im Gange zu halten, muß im Kessel fortwährend Wasser verdampft werden; es ist also klar, daß in gleichem Maaße dem Kessel wieder frisches Wasser zugeführt werden muß, wenn der Gang der Maschine keine Störungen erleiden soll. Dies geschieht nun durch die Druckpumpe *o*, Fig. 505, deren Kolben durch die excentrische Scheibe *g* bewegt wird. Die innere Einrichtung einer solchen Druckpumpe *o* haben wir bereits oben S. 88 kennen gelernt.

Wenn die zu verrichtende Arbeit, der zu überwindende Widerstand im Allgemeinen ab- oder zunimmt, so ist die Folge davon, daß der Gang der Maschine schneller oder langsamer wird. Momentane kurz dauernde Störungen der Art werden schon durch das Schwungrad ausgeglichen; eine allgemeine Verminderung des Widerstandes und der Last aber würde bei unverändertem Zuflusse des Dampfes eine immer zunehmende Beschleunigung des Ganges der Maschine zur Folge haben. Damit nun die Geschwindigkeit nicht über eine gewisse Gränze wachsen kann, muß im Dampfzuflußrohre eine Klappe angebracht seyn, durch deren Drehung dem Dampfe der Weg mehr oder weniger versperrt wird, je nachdem die Klappe mehr und mehr aus der vertikalen Lage (der vollkommenen Oeffnung) in die horizontale (den vollkommenen Verschluß) übergeht. Die Drehung dieser Klappe muß aber durch die Maschine selbst besorgt werden, und dies geschieht durch eine Vorrichtung, welche den Namen Regulator führt.

Die Bewegung der Hauptaxe wird durch Winkelräder auf eine vertikale Axe *a* Fig. 505 übertragen, welche das conische Pendel *V* trägt; es besteht dies aus zwei schweren Kugeln, die an das obere Ende der Stange *a* so angehängt sind, daß sie vermöge ihrer Centrifugalkraft auseinanderfahren, wenn die Axe *a* rasch umgedreht wird; sobald dies aber geschieht, wird die Hülse *h* gehoben und dadurch die Stange *b* in die Höhe gezogen (in Fig. 505 ist dieselbe nur durch eine Linie angedeutet), dadurch aber wird das Drosselventil *n* um seine Axe gedreht und also der Zufluß des Dampfes um so mehr gehemmt, je rascher die Maschine läuft.

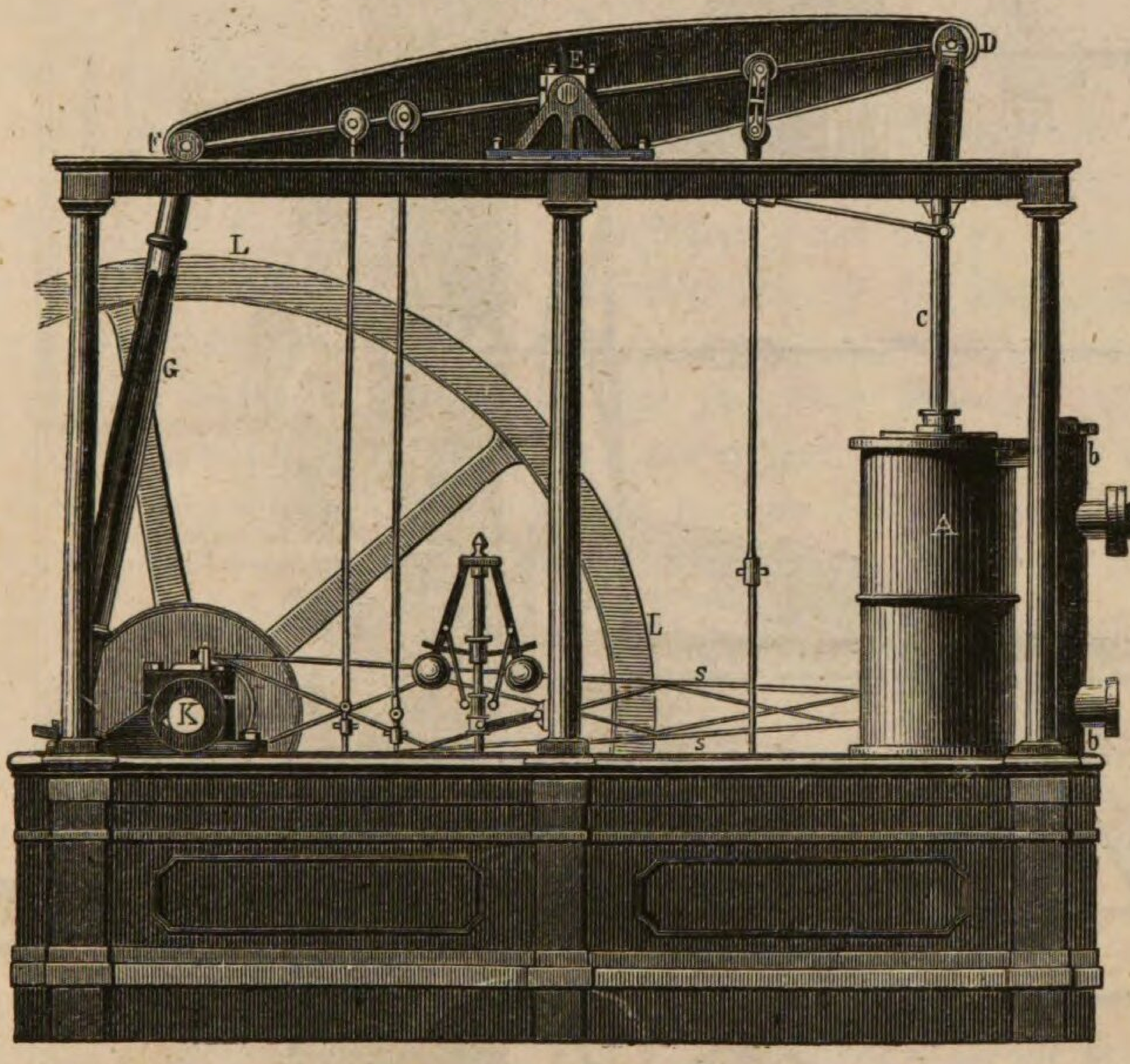
234 **Niederdruckmaschinen.** Bei den eben besprochenen Maschinen ist die eine Seite des Cylinders mit der atmosphärischen Luft in Verbindung, so daß auf der einen Seite des Kolbens der Druck der Atmosphäre lastet, während auf der anderen Seite der Druck des Dampfes wirkt; es ist klar, daß hier der Dampfdruck ein bedeutender seyn muß, da ja ein Theil desselben noch zur Ueberwindung des Luftdrucks verwendet wird und nur der Rest der Bewegung zu gut kommt.

Solche Maschinen heißen **Hochdruckmaschinen**, weil in ihnen Dampf von hoher Spannung in Anwendung kommt.

Soll nun aber die Maschine schon durch Dampf von geringer Spannkraft (von niederem Druck) getrieben werden, so muß man auf der anderen Seite des Kolbens nicht die atmosphärische Luft drücken lassen, sondern einen verdünnten Raum erzeugen, was dadurch geschieht, daß man die verbrauchten Dämpfe nicht in die freie Luft ausströmen läßt, sondern daß man sie zu einem Behälter hinleitet, in welchem sie durch Einspritzen von kaltem Wasser verdichtet werden. Dieser Verdichtungsraum heißt der **Condensator**, und Dampfmaschinen, welche, mit einem Condensator versehen, durch Dämpfe von geringer Spannkraft getrieben werden können, heißen **Niederdruckmaschinen**.

Watt's Maschinen waren Niederdruckmaschinen. Fig. 513 stellt eine

Fig. 513.



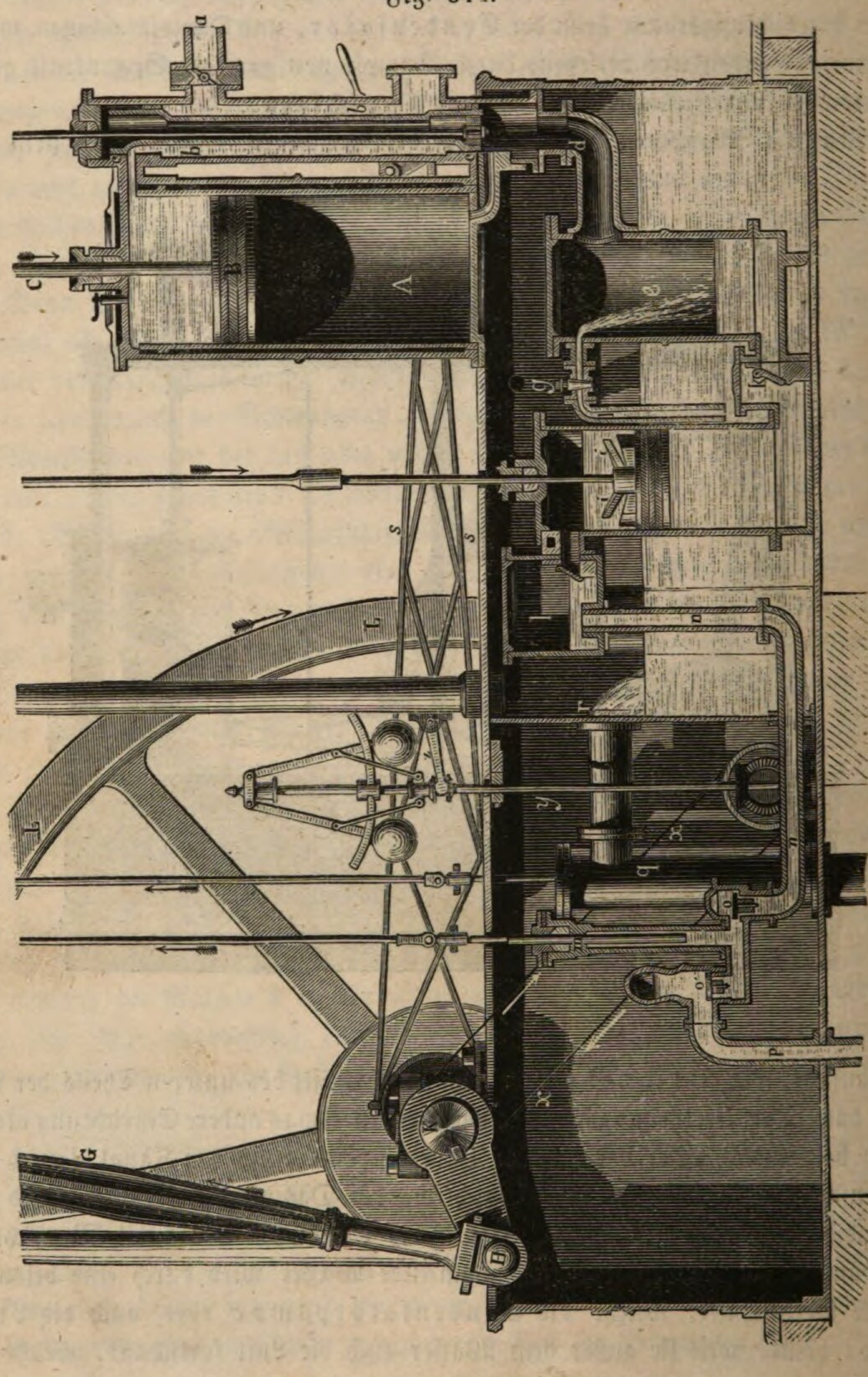
Totalansicht, Fig. 514 (s. f. S.) stellt den Durchschnitt des unteren Theils der Maschine dar. Der Vertheilungsschieber hat hier eine etwas andere Einrichtung als der früher betrachtete. Der verbrauchte Dampf strömt durch den Kanal *d* nach dem Condensator *e*, in welchem die Verdichtung der Dämpfe durch fortwährend eingespritztes Wasser bewirkt wird. Das durch Einspritzen und durch Verdichtung der Dämpfe im Condensator sich sammelnde Wasser wird durch eine besondere Pumpe fortgeschafft, welche die **Condensatorpumpe** oder auch die **Luftpumpe** heißt, weil sie außer dem Wasser auch die Luft fortschafft, welche sich

im Kessel beim Kochen des Wassers entbindet und mit den Dämpfen durch die Maschine läuft.

Bei der **Watt**'schen Maschine wird die Bewegung der Kolbenstange zunächst auf einen zweiarmigen Hebel, den **Balancier** *DF* Fig. 513, übertragen, an dessen anderem Ende die Pleuelstange *G* befestigt ist, welche die Umdrehung der Kurbel bewirkt.

Auch hier geschieht die Führung des Schiebers durch eine excentrische

Fig. 514.



Scheibe und der Regulator dieser Maschine wirkt ganz in ähnlicher Weise, wie bei der Hochdruckmaschine.

Die Locomotive. Eine der bekanntesten und interessantesten Hochdruck- 235 maschinen ist die Locomotive, wie sie auf unseren Eisenbahnen gebraucht wird. Eine solche Locomotive ist Fig. 515 (s. f. S.) dargestellt. *A* ist der Feuerraum. Das Brennmaterial wird durch die Oeffnung *a*, die durch eine Thür geschlossen werden kann, auf den Rost geworfen. Von dem Feuerraume *A* ist aber für die erhitzte Luft kein Ausweg als durch eine Reihe horizontaler Röhren, welche von *A* nach *D* führen; von *D* geht die erhitzte Luft mit dem Rauche durch den Schornstein in die Höhe. In Fig. 516 sieht man, wie die Röhren neben und über einander liegen. Diese Röhren gehen nun mitten durch einen mit Wasser angefüllten Raum; außerdem ist der Feuerraum selbst von allen Seiten mit Wasser umgeben. Durch die außerordentlich große Feuerfläche, mit welcher auf diese Weise das Wasser in Berührung ist, bildet sich fortwährend eine bedeutende Dampfmenge. Die Dämpfe sammeln sich über dem Wasser in dem mit *B* und *C* bezeichneten Raume; von *C* werden sie durch die Röhre *c* dem Cylinder zugeführt. Läge die Mündung der Röhre *c* tief, so würde durch das heftige Kochen viel Wasser mechanisch in die Röhre *c* und von da in die Cylinder mit fortgerissen werden. Um dies zu verhindern, ist der Dampfraum bei *C* erhöht. Die Röhre *c* theilt sich bald in zwei andere, *d* und *d'*, wie man dies in Fig. 516 sieht. In Fig. 515 ist nur eine dieser Röhren, nämlich *d*, sichtbar. Jede führt zu einem Behälter *i*, aus welchem der Dampf in die Cylinder *F* tritt. Auf jeder Seite des Wagens liegt ein Cylinder, wie man Fig. 516 sieht; von diesen Cylindern ist in Fig. 515 nur der eine, nämlich der vordere, sichtbar. Er ist hier im Längendurchschnitte dargestellt, die Durchschnittsfläche aber fällt nicht mit der der ganzen übrigen Figur zusammen, sondern liegt vor derselben. Die Cylinder liegen horizontal, und der Kolben sammt den Kolbenstangen gehen in einer horizontalen Richtung hin und her. Von dem Behälter *i*, in welches der Dampf durch die Röhren *c* und *d* geleitet wird, gehen zwei Kanäle zu dem einen und dem anderen Ende des Cylinders, wie bei der Hochdruckmaschine, die wir auf Seite 425 betrachtet haben, und hier geschieht auch die Vertheilung des Dampfes ganz auf dieselbe Weise durch den Vertheilungsschieber. Der verbrauchte Dampf gelangt durch die Höhlung des Schiebers in den Schornstein, aus welchem er entweicht.

Die Kolbenstange ist durch sogenannte Coulissen festgehalten, d. h. sie ist durch dieselben verhindert, von ihrer Bahn abzuweichen, so daß sie nur in einer und derselben geraden Linie hin- und hergehen kann. An der Kolbenstange ist unmittelbar die Treibstange befestigt, welche die Kurbel *n* um die Axe *m* umdreht. An der Axe *m* sind aber auch die mittleren Räder des Wagens befestigt, so daß also durch jeden Hin- und Hergang des Kolbens eine ganze Umdrehung des Rades erfolgt; bei jedem Hin- und Hergange des Kolbens geht also der Wagen um eine Strecke weiter, welche dem Umfange der mittleren Räder gleich ist.

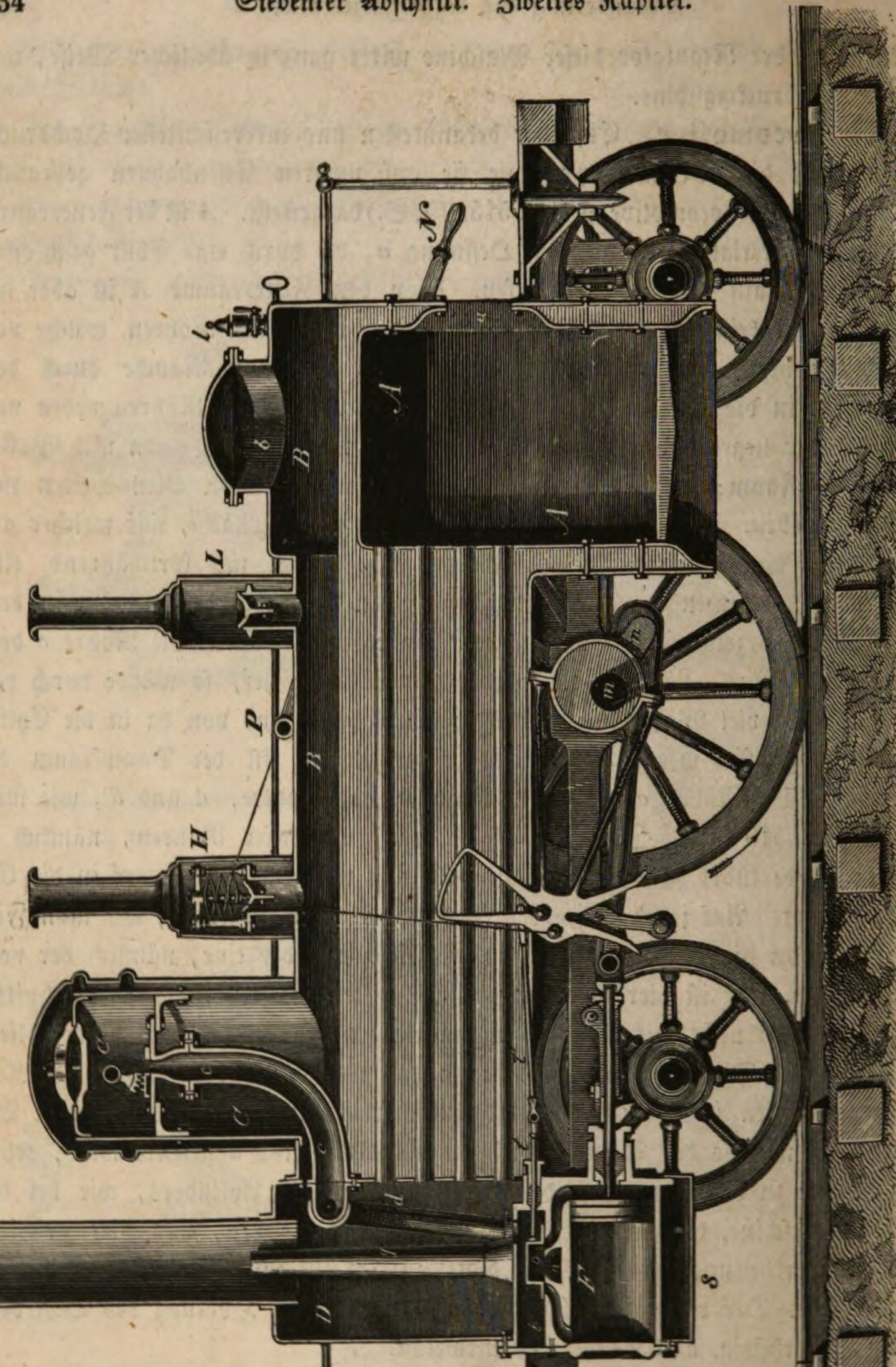


Fig. 515.

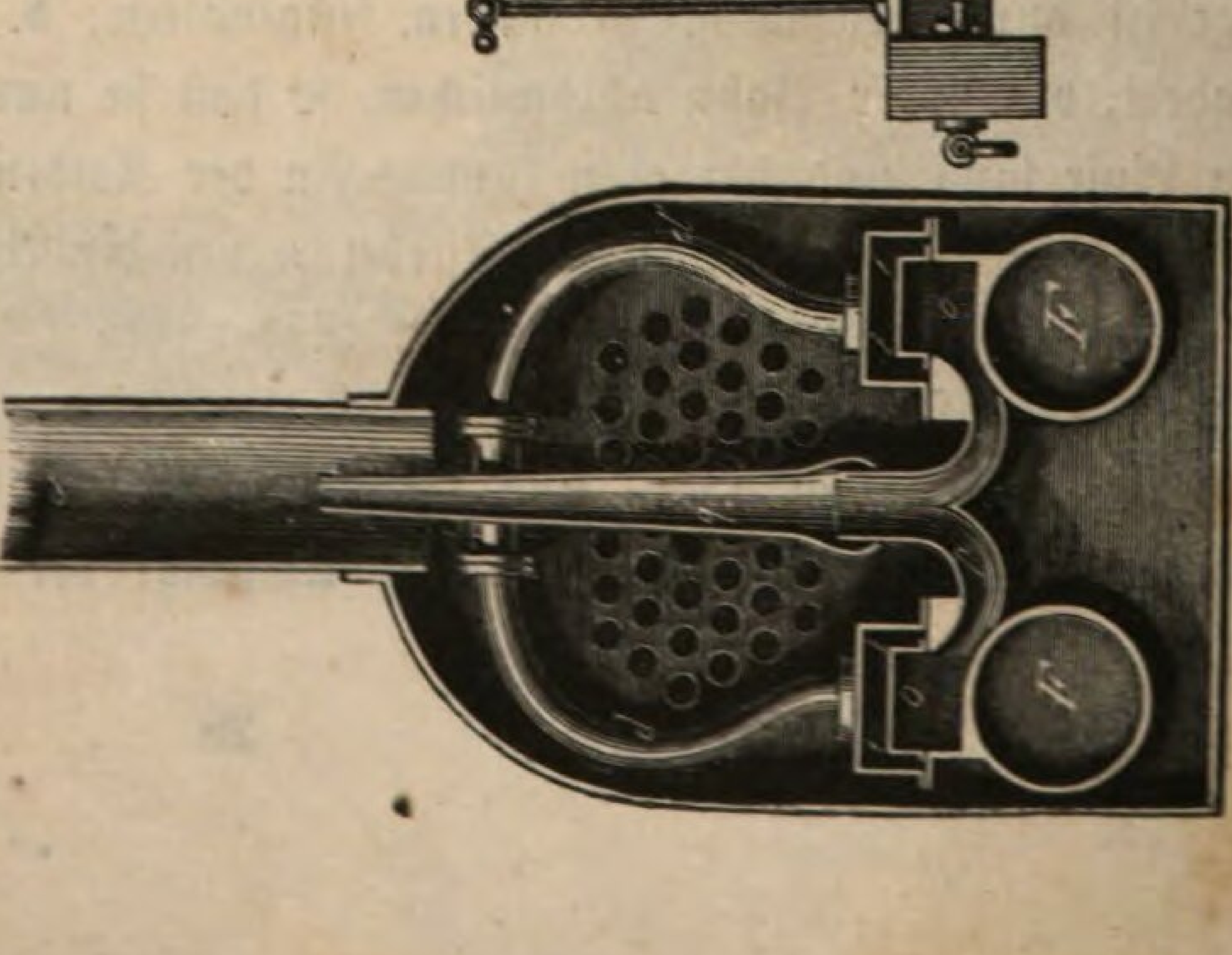


Fig. 516.

An der Axe *m* ist auch die excentrische Scheibe befestigt, durch welche der Schieber im Behälter *i* bewegt wird. Wie wir in unserer Figur sehen, greift das ungefähr X förmige Ende des am Ringe der excentrischen Scheibe befestigten Gestänges am oberen Ende eines Hebels ein, dessen Stützpunkt bei *s* ist. Durch die Bewegung dieses Hebels werden aber auch die daran befestigten Stangen *t* und durch diese der Schieber hin und her gezogen.

Durch Aufziehen des Hebels *N* wird das X niedergedrückt und dadurch eine rückgängige Bewegung der Locomotive bewirkt; doch können wir hier nicht weiter ins Einzelne eingehen. *H* und *L* sind Sicherheitsventile, *l* ist ein Pfeifchen welches zu Signalen dient.

Berechnung des Effects der Dampfmaschinen. Der Effect, 236
welchen eine Dampfmaschine hervorzubringen im Stande ist, die Kraft der Maschine, hängt von der Wassermenge ab, die in einer gegebenen Zeit im Kessel in Dampf verwandelt wird; untersuchen wir deshalb, welche Wirkung 1 Liter Wasser in Dampfform hervorzubringen im Stande ist. — Nehmen wir an, die Kolbenfläche betrage 1 Quadratdecimeter, die Höhe des Cylinders (die Hubshöhe) aber sey 10 Decimeter, so ist der Inhalt des Cylinders 10 Kubikdecimeter oder 10 Liter; um also den Kolben von unten bis oben zu treiben, müssen 10 Liter Dampf aus dem Kessel in den Cylinder übergehen. Wenn nun der Dampf eine Spannkraft von einer Atmosphäre hat, so ist der Druck, den er auf jedes Quadratcentimeter der Kolbenfläche ausübt, ungefähr 1 Kilogramm, der Gesammtdruck auf den ganzen Kolben beträgt demnach 100 Kilogramme; wenn also gar keine Bewegungshindernisse vorhanden wären, so könnte man den Kolben mit 100 Kilogrammen belasten, und diese 100 Kilogramme würden 10 Decimeter hoch gehoben, wenn man 10 Liter Wasserdampf von 100 Grad in den Cylinder führt. Der Effect also, den 10 Liter Wasserdampf von 100° hervorbringen können, ist der Hebung von 100 Kilogrammen auf eine Höhe von 10 Decimetern oder der Hebung von 1000 Kilogrammen auf eine Höhe von 1 Decimeter äquivalent. Ein Liter Wasser giebt aber 1700 Liter Wasserdampf von 100°, mit 1 Liter Wasser, in Dampf von 100° verwandelt, kann man also einen Effect hervorbringen, welcher der Hebung von 170000 Kilogrammen auf eine Höhe von 1 Decimeter äquivalent ist.

Um die Kraft der Maschine besser übersehen zu können, vergleicht man sie gewöhnlich mit Pferdekräften. Nimmt man an, daß ein Pferd in 1 Secunde eine Last von 750 Kilogrammen 1 Decimeter hoch heben könne (in der That ergiebt sich aus den besten Beobachtungen über die Arbeit der Pferde, daß sie bei zweckmäßigster Verwendung ihrer Kräfte, bei andauernder Arbeit einen Effect hervorbringen, welcher dem erwähnten äquivalent ist), so würde man sagen, daß eine Maschine, in welcher in jeder Secunde so viel Dampf erzeugt wird, als nöthig ist, um 750 Kilogramme 1 Decimeter (oder 500 Pfund 1 Fuß) hoch zu heben, eine Dampfmaschine von 1 Pferdekraft sey.

Nun kann aber der Wasserdampf, welcher aus 1 Liter Wasser erhalten wird, 170000 Kilogramme 1 Decimeter hoch heben; wenn also im Kessel 1 Li-

ter Wasser in $\frac{170000}{750}$, also in 226 Secunden verdampft wird, so ist der Totaleffect, den dieser Dampf in der Maschine hervorbringen kann, einer Pferdekraft gleich. Eine solche Maschine verzehrt also in einer Stunde ungefähr 15 Liter Wasser.

Nicht alle mechanische Kraft des Dampfes kann aber als Nutzeffect angeschlagen werden. Sehr viel geht verloren, weil der Kolben nicht gegen einen absolut leeren Raum drückt, weil die Reibung des Kolbens überwunden werden muß, weil mehrere Pumpen in Bewegung gesetzt werden müssen u. s. w. Alle diese Widerstände verringern den Nutzeffect der Maschine fast auf die Hälfte des oben berechneten.

Einen großen Vortheil hat man bei den Hochdruckmaschinen durch Anwendung der Expansion des Dampfes im Cylinder erlangt, welche dadurch hervorgebracht wird, daß der Dampfzufluß abgesperrt wird, wenn der Kolben erst einen Theil seines Weges, etwa $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ u. s. w. zurückgelegt hat. Daß durch Anwendung des Expansionsprincips bei gleichem Dampfverbrauche ein größerer Effect hervorgebracht wird, läßt sich durch folgende einfache Betrachtung einsehen.

In einen Dampfcylinder ströme während des ganzen Kolbenhubs, wie dies bei gewöhnlichen Maschinen der Fall ist, Dampf ein, dessen Spannkraft wir zu 2 Atmosphären annehmen wollen, so ist am Ende des Kolbenhubs der ganze Cylinder mit Dampf von 2 Atmosphären Spannkraft gefüllt, und während dieses Kolbenhubs ist ein mechanischer Effect hervorgebracht worden, den wir mit E bezeichnen wollen.

Ließe man nun in denselben Cylinder Dampf von doppelter, also von 4 Atmosphären Spannkraft eintreten, so würde der Druck gegen den Kolben doppelt so groß seyn, und der mechanische Effect E würde schon hervorgebracht worden seyn, wenn der Kolben erst den halben Hub vollendet hat, wenn er in der Mitte des Cylinders angekommen ist. Wird nun in diesem Momente der fernere Zufluß des Dampfes in den Cylinder abgesperrt, so wird der Kolben die übrige Hälfte seines Weges fortsetzen, während der Druck, der ihn treibt, nach und nach bis zur Hälfte abnimmt; denn wenn er am Ende seiner Bahn ankommt, so ist die Spannkraft des Dampfes noch 2 Atmosphären.

Da schon während der ersten Hälfte des Kolbenhubs der mechanische Effect E hervorgebracht worden ist, so ist der ganze Effect, welchen der Dampf während der zweiten Hälfte des Kolbenhubs hervorbringt, während er sich also so ausdehnt, daß seine Spannkraft von 4 Atmosphären bis zu 2 Atmosphären abnimmt, als Gewinn zu betrachten; denn die Quantität des Dampfes, welche am Ende des Kolbenhubs den Cylinder erfüllt, ist gerade eben so groß, als ob während des ganzen Kolbenhubs Dampf von 2 Atmosphären Spannkraft eingeströmt wäre.

Die verschiedenen Vorrichtungen, durch welche eine rechtzeitige Absperrung

des Dampfes in den Expansionsmaschinen bewirkt wird, können wir hier nicht näher betrachten.

Abhängigkeit des Siedepunktes vom Druck. Die Verwandlung 237
der Flüssigkeiten in gasförmige Körper nennt man im Allgemeinen Verdampfung. Die Flüssigkeiten verdampfen entweder durch das Kochen, wenn sich durch die ganze Masse der Flüssigkeit Dämpfe bilden, oder durch Verdunsten, wenn die Dampfbildung bloß an der Oberfläche vor sich geht.

Wenn man das Kochen einer Flüssigkeit beobachtet, sieht man in der Regel nur eine mehr oder minder heftige Bewegung aller Theilchen; wenn man aber die Flüssigkeit in einem gläsernen Gefäße kochen läßt, so sieht man die Dampfblasen, welche sich an den wärmeren Gefäßwänden bilden und in die Höhe steigen. Anfangs klein, nehmen sie an Volumen zu, je mehr sie steigen. An den heißesten Stellen der Wand folgen die Blasen am schnellsten auf einander. Damit sich die Blasen in der Flüssigkeit bilden können, welche doch von allen Seiten einen Druck auf sie ausübt, muß der Dampf, welcher die Blasen ausfüllt, offenbar eine Spannkraft haben, welche dem Drucke der Umgebung das Gleichgewicht hält. Die erste Bedingung des Kochens ist also, daß die Temperatur so hoch ist, daß die Spannkraft der Dämpfe den von allen Seiten auf die zu bildenden Dampfblasen wirkenden Druck aushalten kann. Eine zweite Bedingung ist die, daß genug Wärme vorhanden sey, welche bei der Dampfbildung als latente Wärme absorbirt wird.

Aus der ersten Bedingung folgt, daß der Siedepunkt einer Flüssigkeit mit dem auf ihr lastenden Drucke sich ändert, aus der zweiten aber, daß die Schnelligkeit des Kochens von der Wärmemenge abhängt, welche in einer gegebenen Zeit durch die Gefäßwände hindurch der Flüssigkeit zugeführt wird.

Am Spiegel des Meeres und unter dem mittleren Drucke von 760 Millimetern kocht das reine Wasser bei 100°; auf dem Gipfel des Montblanc, in einer Höhe von 4775 Metern, wo der Druck der Atmosphäre nur noch 417 Millimeter beträgt, kocht das Wasser schon bei einer Temperatur, bei welcher die Spannkraft des Wasserdampfes 417 Millimeter beträgt, d. h. ungefähr bei 84°. In noch größerer Höhe würde das Wasser bei noch niedrigerer Temperatur sieden. Wenn man die Tafel für die Spannkraft der Dämpfe einer Flüssigkeit hat, so kann man leicht die Temperatur des Siedepunktes bei gegebenem Drucke finden, denn es ist derjenige Temperaturgrad, für welchen die Spannkraft des gesättigten Dampfes jenem Drucke gleich ist.

Bei einem Drucke von 30 Millimetern ist die Siedetemperatur des Wassers 30°, weil bei dieser Temperatur die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes 30 Millimeter ist. Unter einem Drucke von 10 Millimetern siedet das Wasser bei 11°, unter einem Drucke von 5 Millimetern bei 0°.

Die Wahrheit dieser Folgerungen läßt sich leicht durch den Versuch nachweisen. Man bringt warmes Wasser in einem Glasgefäße unter den Recipien-

ten der Luftpumpe. Nach einigen Kolbenzügen nun beginnt das Kochen mit Heftigkeit gerade so, als ob das Wasser an freier Luft über einem lebhaften Feuer stände. Dieses Sieden hört aber bald auf, weil der Dampf den Recipienten erfüllt und selbst auf die Flüssigkeit drückt; ein neuer Kolbenzug aber nimmt diesen Dampf wieder weg und macht, daß das Kochen von Neuem beginnt. Mit unseren Luftpumpen ist es nicht möglich, das Wasser bei 0° ins Sieden zu bringen, weil man keine Verdünnung von 2 Millimetern hervorbringen kann, indem sich beständig Dampf an der Oberfläche des Wassers bildet.

Fig. 517.



An dem Fig. 517 abgebildeten Apparate beobachtet man eine noch auffallendere hieher gehörige Erscheinung. Ein Ballon *a* mit langem Halse wird über die Hälfte mit Wasser gefüllt; wenn durch Kochen desselben alle Luft ausgetrieben ist, verschließt man den Hals durch einen Kork und kehrt den Ballon um, wie Fig. 517 zeigt. Wenn man ihn sich selbst überläßt, ist kein Sieden zu beobachten; wenn man aber kaltes Wasser auf den oberen Theil gießt, so beginnt es auf der Stelle mit großer Heftigkeit. Das kalte Wasser bringt das Wasser im Ballon ins Kochen, weil es den Dampf im oberen Theile des Ballons verdichtet und so den auf der Flüssigkeit lastenden Druck vermindert.

Die Variationen des Siedepunktes hat man durch directe Versuche an hochgelegenen Orten der Alpen, Pyrenäen und anderer Gebirge bestätigt.

Das kochende Wasser ist also nicht an allen Orten der Erde gleich warm, und folglich ist es auch nicht überall gleich tauglich zu häuslichen Zwecken, zur Bereitung der Speisen. In Quito z. B. kocht das Wasser schon bei 90°, und diese Temperatur ist zum Kochen mancher Substanzen zu niedrig, welche eine Temperatur von 100° erfordern.

Da der Barometerstand an einem und demselben Orte beständig schwankt, so folgt, daß sich auch der Siedepunkt beständig ändert.

Wenn man den Druck auf die Flüssigkeit vermehrt, so wird dadurch das Kochen verzögert, und die Temperatur steigt, wie wir dies bereits bei dem kleinen Dampfkessel auf Seite 423 gesehen haben. — Die ersten derartigen Versuche machte **Papin**, ein in der Mitte des 17ten Jahrhunderts in Marburg lebender Gelehrter, welcher mit dem nach ihm genannten **Papinianischen Topf** oder **Digestor**, der im Wesentlichen nichts Anderes ist als ein kleiner mit einem Sicherheitsventil versehener Dampfkessel, nicht allein die große mechanische Kraft des Dampfes nachwies, sondern auch zeigte, daß man Fleisch, Knochen u. s. w. in einem solchen Topfe bei erhöhten Temperatur und vermehrtem Druck weit vollständiger extrahiren kann als bei der gewöhnlichen Siedetemperatur.

Wenn man in einem Gefäße Wasser ins Kochen bringt, aus welchem der Dampf nur durch verhältnißmäßig kleine Oeffnungen abziehen kann, so beobach-

tet man eine Erhöhung des Siedepunktes. Durch eine kleine Oeffnung kann nämlich nur dann aller Dampf, welcher durch die in jedem Momente in die Flüssigkeit übergehende Wärme erzeugt wird, ausströmen, wenn durch die größere Spannkraft des Dampfes eine größere Ausströmungsgeschwindigkeit möglich geworden ist.

In einer flüssigen Masse wirkt auf die Theilchen im Inneren nicht allein der Druck, welcher auf der Oberfläche lastet, sondern auch noch das Gewicht einer Flüssigkeitssäule. Hätte man z. B. einen 32 Fuß tiefen mit Wasser gefüllten Kessel, so würde am Boden ein Druck von 2 Atmosphären stattfinden, und hier würden sich also erst bei einer Temperatur von 121,4° Dampfblasen bilden können. Da aber die Temperatur der flüssigen Schichten an der Oberfläche nicht über 100° steigen kann, so wird die Flüssigkeit vom Boden, ihres geringeren specifischen Gewichtes wegen, fortwährend aufsteigen. Weil der Druck mit dem Steigen abnimmt, bilden sich Dampfblasen, ihre Temperatur nimmt aber allmälig von 121° bis 100° ab. Die Dampfblasen, welche sich in der Tiefe bilden, nehmen an Größe um so mehr zu, je höher sie steigen, weil der Druck, welcher auf sie wirkt, immer geringer wird. Diese Erscheinungen beobachtete man selbst schon in kleinen Gefäßen, in welchen das Wasser nur einige Zoll tief ist. — Bevor das vollständige Kochen beginnt, bilden sich an dem Boden schon Dampfblasen, welche aber beim Aufsteigen sich plötzlich wieder verdichten, weil sie in Wasserschichten kommen, deren Temperatur noch zu niedrig ist. Daher rührt das eigenthümliche Geräusch, welches man einige Augenblicke vor dem vollständigen Kochen wahrnimmt. Wenn man den Versuch in einem Glaskolben anstellt, so beobachtet man, wie sich die Blasen am Boden bilden, wie sie steigen und alsbald verschwinden. Man sagt alsdann, das Wasser *singt*. Das Singen ist ein Zeichen des bald erfolgenden vollständigen Kochens.

Auch durch Substanzen, welche im Wasser aufgelöst sind, wird das Sieden verzögert; so siedet eine gesättigte Lösung von Kochsalz erst bei 108,4°, eine Lösung von Salpeter bei 116°; eine gesättigte Lösung von essigsaurem Kali erst bei 169°, von salpetersaurem Ammoniak erst bei 180°.

Verdunstung nennt man die Bildung von Dampf an der freien Ober- 238
fläche der Flüssigkeit, während, wie wir gesehen haben, das *Kochen* darin besteht, daß sich auch im Inneren der flüssigen Masse Dampf bildet. Das Wasser verdampft an der Oberfläche der Flüsse, Seen und Meere, es verdampft an der Oberfläche des feuchten Bodens, an den Pflanzen. Offenbar hat der sich so bildende Wasserdampf keine Spannkraft, welche stark genug ist, um den Druck der atmosphärischen Luft zu überwinden. Die alltäglichsten Beobachtungen zeigen uns, daß sich bei jeder Temperatur Wasserdampf bildet, und daß er sich auch bei der schwächsten Tension doch in den Lüften verbreitet. In einem lufterfüllten Raume kann sich gerade eben so viel Wasserdampf verbreiten, wie in

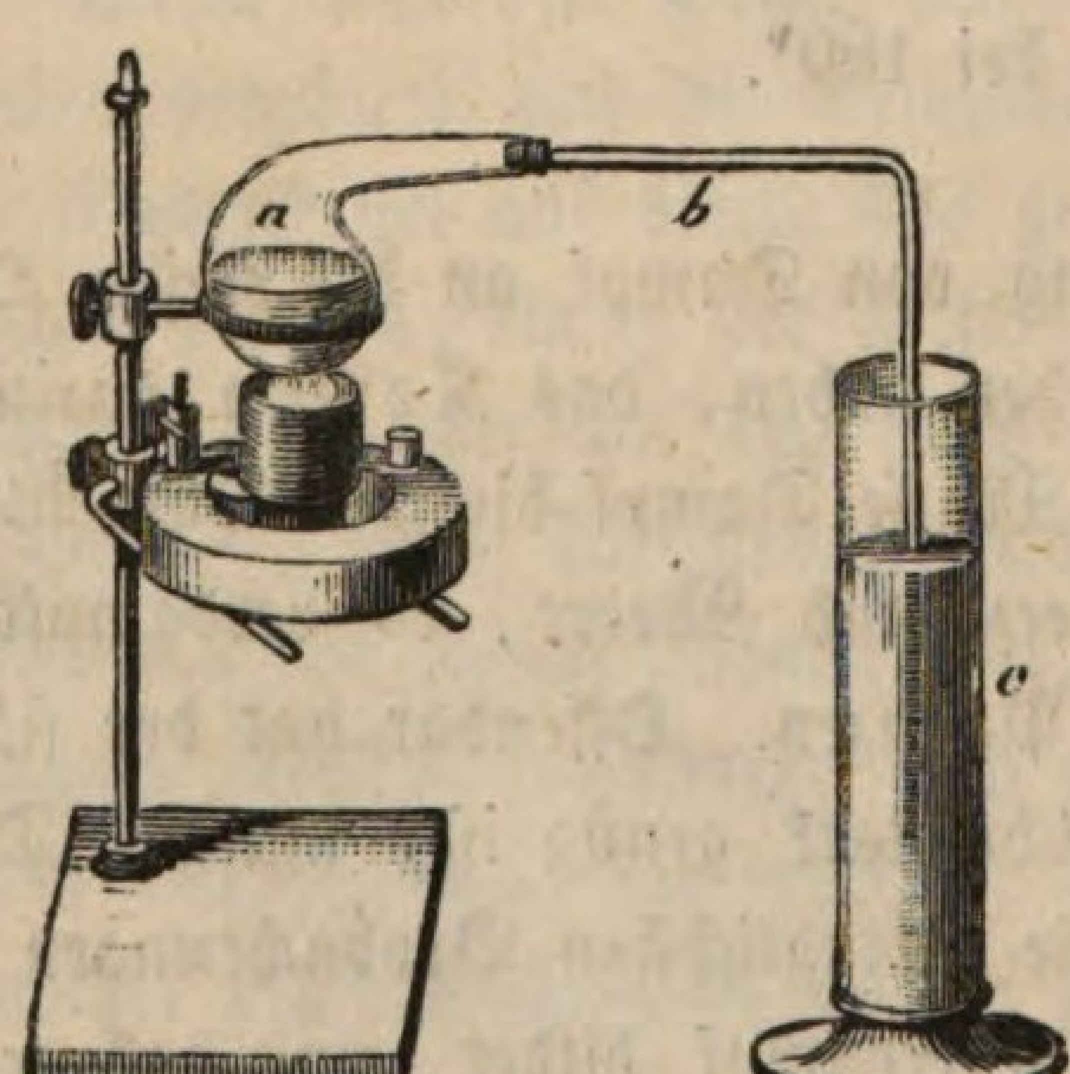
einem gleichgroßen luftleeren Raume unter sonst gleichen Umständen. Der Wasserdampf, so schwach seine Spannkraft auch seyn mag, mischt sich mit der Luft, wie sich zwei Gase mischen. Die einzige Bedingung also, welche erfüllt seyn muß, damit eine Flüssigkeit verdunsten kann, ist die, daß die umgebenden Luftschichten nicht mit Dampf gesättigt sind; da ferner bei der Mischung zweier Gase die Moleküle des einen ein mechanisches Hinderniß für die Verbreitung des anderen bilden, so kommt es, daß bei der Verdunstung die Luft ein Hinderniß für die schnelle Verbreitung des Dampfes ist. In einer vollkommen ruhigen Atmosphäre geht deshalb die Verdunstung nur langsam vor sich, während bei bewegter Luft die Verdunstung weit rascher vor sich geht, indem die Flüssigkeit stets mit neuen Luftschichten in Berührung kommt, die noch nicht mit Dampf gesättigt sind. Daher kommt es, daß, wenn ein trockener Wind mit Lebhaftigkeit weht, das Wasser sehr rasch verdunstet.

239 **Latente Wärme der Dämpfe.** Wenn eine Flüssigkeit verdampft, so muß sie Wärme absorbiren; diese beim Verdampfen absorbirte Wärme ist für das Gefühl und für das Thermometer ebenso verschwunden wie die Wärme, welche beim Schmelzen gebunden wird.

Daß bei der Dampfbildung Wärme gebunden wird, geht schon daraus hervor, daß die Temperatur einer Flüssigkeit während des Kochens unverändert bleibt. Die Temperatur des siedenden Wassers bleibt 100°, wie sehr wir auch das Feuer verstärken mögen; alle Wärme, welche man dem siedenden Wasser zuführt, dient nur dazu, das Wasser von 100° in Dampf von 100° zu verwandeln.

Das Binden von Wärme beim Verdampfen der Flüssigkeiten läßt sich leicht dem Gefühle merklich machen; man gieße nur einige Tropfen einer leicht verdampfenden Flüssigkeit, etwa Weingeist oder Schwefeläther, auf die Hand, so wird man ein Gefühl von Kälte haben, weil der Hand die zum Verdampfen der Flüssigkeit nöthige Wärme entzogen wird. Wenn man die Kugel eines Thermometers mit Baumwolle umwickelt und diese mit Schwefeläther betröpfelt, so sinkt das Thermometer um mehrere Grade.

Fig. 518.



Nachdem wir nun die Bindung der Wärme bei der Dampfbildung der Art nach kennen gelernt haben, kommt es darauf an, die latente Wärme der Dämpfe auch der Größe nach zu bestimmen, d. h. zu ermitteln, wieviel Wärme nöthig ist, um eine bestimmte Menge irgend einer Flüssigkeit in Dampf zu verwandeln.

In Fig. 518 stelle *a* einen Glaskolben vor, in welchem Wasser mit Hülfe einer Weingeistlampe kochend erhalten wird; wenn nun die sich bildenden Dämpfe durch ein Glasrohr *b* in ein cylindrisches Gefäß

c geleitet werden, welches mit kaltem Wasser gefüllt ist, so werden die Dämpfe hier verdichtet, die Wärme also, welche bei der Bildung der Dämpfe in *a* gebunden wurde, muß in *c* wieder frei werden, das kalte Wasser in *c* wird also allmälig erwärmt, und aus der hier hervorgebrachten Temperaturerhöhung kann man auf die Größe der latenten Wärme der Dämpfe schließen.

Nehmen wir an, das Kochen im Gefäße *a* habe schon einige Zeit gedauert, so daß alle Luft aus dem Gefäße ausgetrieben ist, und nun erst tauche man das Ende des gekrümmten Rohrs in das kalte Wasser des Cylinders *c*, so werden alle Dampfblasen alsbald verdichtet, so wie sie mit dem kalten Wasser in Berührung kommen. In dem Maaße aber, als das Wasser in *c* wärmer wird, werden die Dampfblasen größer, bis endlich, wenn auch das Wasser in *c* zur Siedhitze erwärmt ist, die Dampfblasen unverdichtet durch die ganze Flüssigkeitsmasse aufsteigen, also in *c* selbst ein förmliches Kochen stattfindet. In dem Augenblicke, in welchem das Kochen in *c* beginnt, wird der Versuch unterbrochen, indem man den Cylinder *c* wegnimmt.

Gesetzt nun, in *c* hätten sich zu Anfange des Versuchs 11 Kubikzoll Wasser von 0° befunden, so wird der Cylinder jetzt, nach Beendigung des Versuchs, 13 Kubikzoll Wasser von 100° enthalten; es sind also 2 Kubikzoll Wasser hinzugekommen. Diese 2 Kubikzoll Wasser sind im Gefäße *a* verdampft und im Cylinder *c* verdichtet worden, die latente Wärme, welche in *a* gebunden wurde, ist in *c* wieder frei geworden und hat hier die 11 Kubikzoll Wasser von 0° auf 100° erwärmt; dieselbe Wärmemenge also, welche bei der Verdampfung von 2 Kubikzoll Wasser absorbirt wird, reicht hin, um die Temperatur von 11 Kubikzoll Wasser von 0° bis 100° zu erhöhen. Nun aber verhalten sich 2 zu 11 wie 1 zu 5,5; wir können das Resultat unsers Versuchs also auch folgendermaßen ausdrücken: Die Wärmemenge, welche nöthig ist, um eine bestimmte Quantität Wasser von 100° in Dampf von 100° zu verwandeln, reicht hin, um die Temperatur einer $5\frac{1}{2}$mal so großen Wassermasse von 0° auf 100° zu erhöhen.

Wir haben oben angeführt, daß man als Einheit der Wärmemengen diejenige Wärmequantität annimmt, welche erforderlich ist, um die Temperatur von 1 Pfund Wasser um 1° zu erhöhen; um die Temperatur von $5\frac{1}{2}$ Pfund Wasser um 1° zu erhöhen, sind also 5,5, und um die Temperatur dieser Wassermasse um 100° zu erhöhen, sind 550 solcher Wärmeeinheiten nöthig

Die latente Wärme von 1 Pfund Wasserdampf ist demnach gleich 550.

Der eben angeführte Versuch ist nun nicht geeignet, die latente Wärme des Wasserdampfes genau zu bestimmen, er wird immer mehr oder weniger unrichtige Resultate geben; er ist aber sehr geeignet, den Zusammenhang der Sache recht anschaulich zu machen. Was die Resultate dieses Versuchs besonders ungenau macht, ist der Umstand, daß bei der hohen Temperatur, zu welcher man das Wasser im Cylinder *c* erheben muß, ein bedeutender Wärmeverlust an die Umgebung stattfindet; dann aber wird auch eine nicht unbedeutende Quantität Wasserdampf schon im Rohre verdichtet, giebt hier schon eine frei werdende Wärme an die Luft ab und kommt als Wasser im Cylinder *c* an; man begreift also

leicht, daß, bis das Wasser in *c* ins Kochen kommt, mehr Wasser aus dem Gefäße *a* herübergekommen seyn wird, als es der Fall seyn würde, wenn diese beiden Fehlerquellen nicht vorhanden wären; dieser Versuch wird also in der Regel einen zu kleinen Werth für die latente Wärme des Wasserdampfes geben. Wir können hier die genaueren Methoden zur Bestimmung dieser Größe nicht näher auseinandersetzen.

Bei der Destillation werden die in irgend einem Gefäße durch Erwärmung gebildeten Dämpfe in ein Rohr geleitet, welches mit kaltem Wasser umgeben ist; dadurch werden die Dämpfe in diesem Rohre in tropfbare Flüssigkeit verwandelt, die Temperatur des Kühlwassers aber wird durch die bei der Condensirung der Dämpfe frei werdende Wärme bedeutend erhöht. Man kann sich davon leicht schon an dem kleinen Destillirapparate, Fig. 519, überzeugen, bei welchem die

Fig. 519.

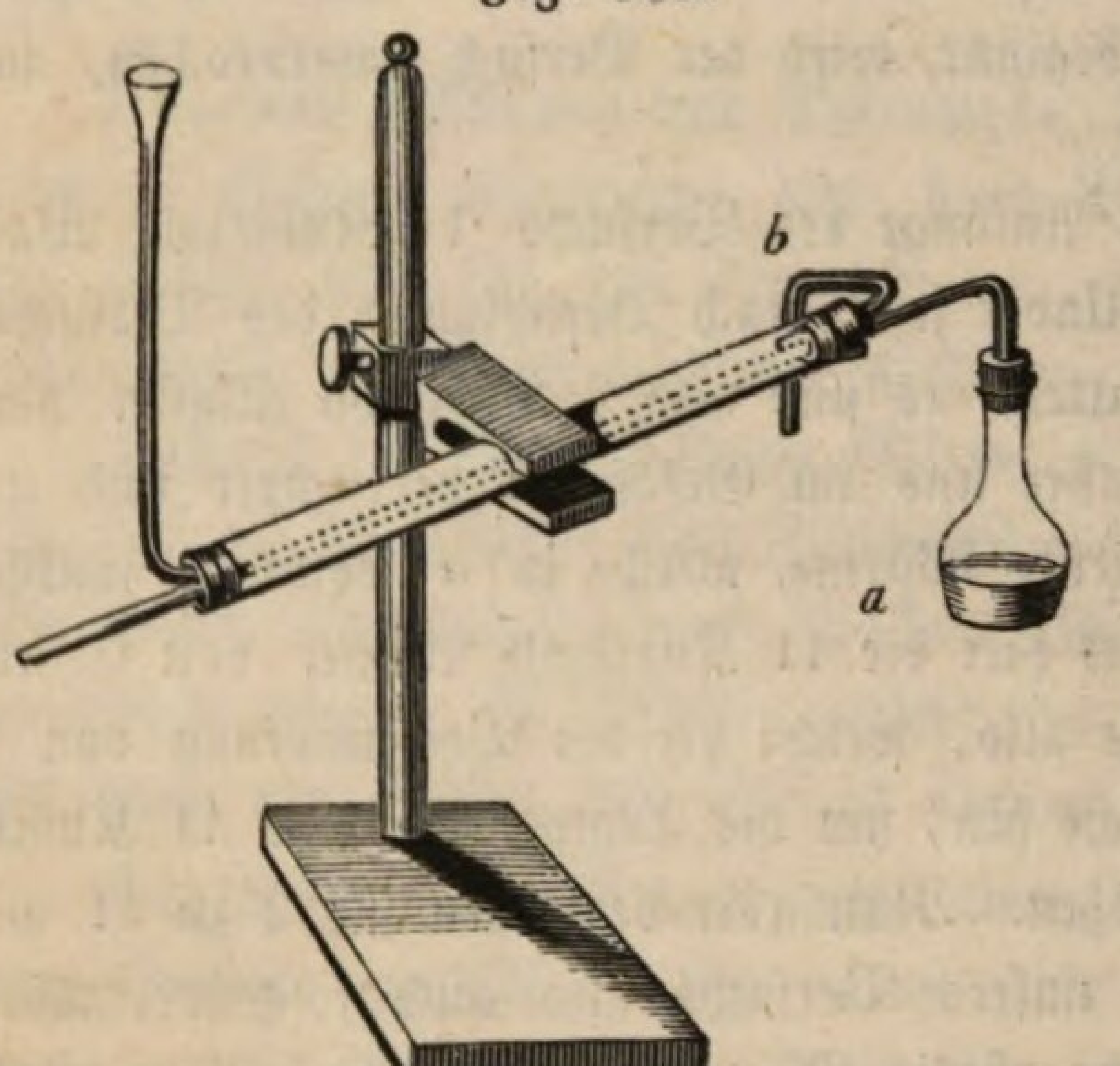
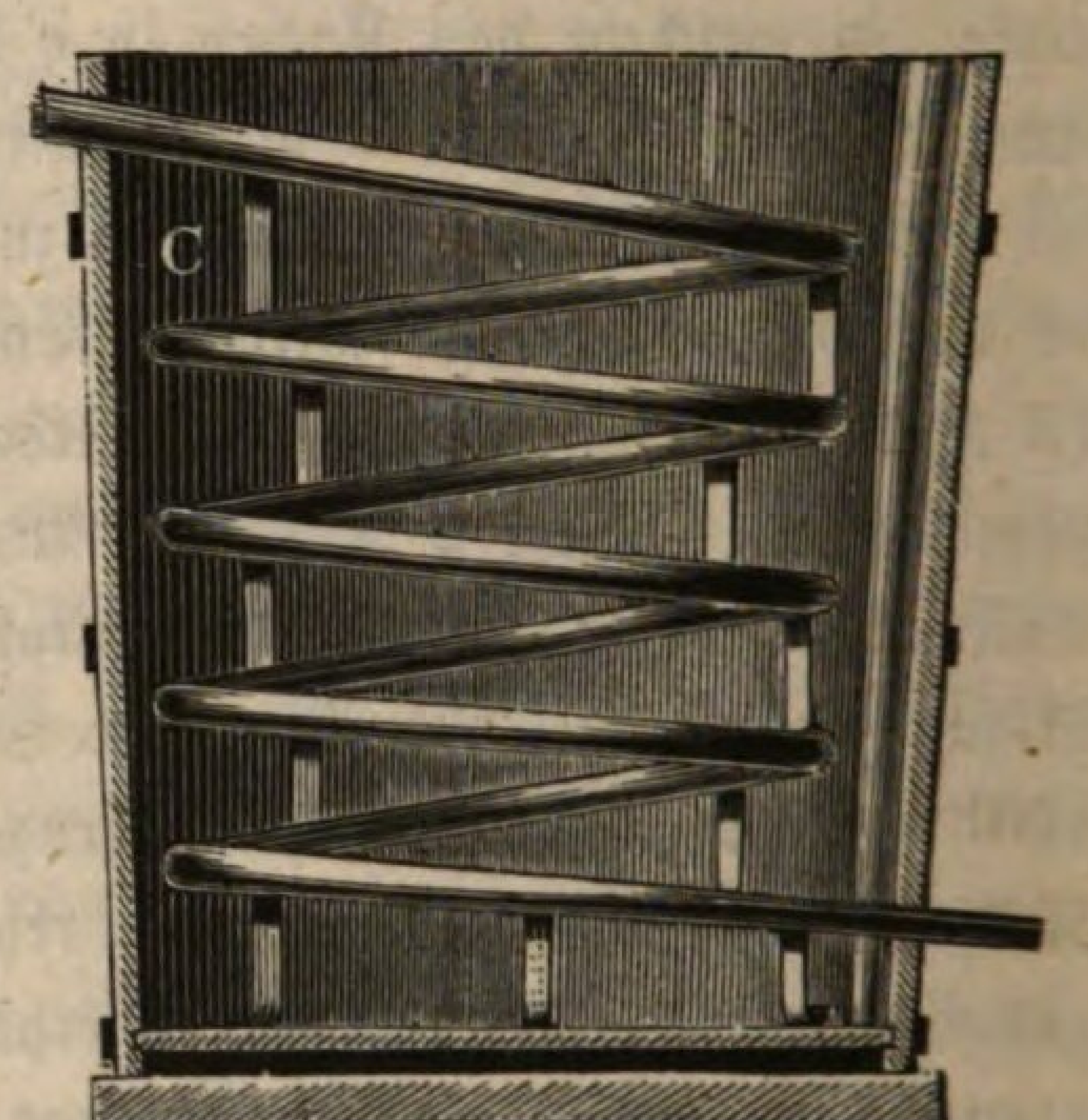


Fig. 520.



Dämpfe aus dem Glaskolben, in welchem sie erzeugt werden, in ein gerades Rohr geleitet werden, welches durch ein weiteres das Kühlwasser enthaltendes Rohr hindurchgeht. Das Kühlwasser, welches am unteren Ende des Kühlrohrs kalt zufließt, fließt am oberen Ende des Kühlrohrs erwärmt wieder ab. Bei Destillationen, welche in größerem Maaßstabe ausgeführt werden, ist das Rohr, in welchem die Dämpfe condensirt werden sollen, in Form einer Schraubenlinie durch das mit dem Kühlwasser gefüllte Gefäß geleitet, wie man Fig. 520 sieht, damit die Dämpfe möglichst lange mit dem kalten Wasser in Berührung bleiben und man überzeugt seyn kann, daß am offenen Ende des Rohrs kein Dampf unverdichtet entweicht. Wenn ein solcher Apparat einige Zeit im Gange geblieben ist, so wird man die oberen Schichten des Wassers im Kühlgefäße immer sehr heiß finden, weil natürlich das erwärmte Wasser sogleich in die Höhe steigt.

Man könnte nun mit jedem Destillirapparate den Werth der latenten Wärme der Dämpfe bestimmen, wenn es möglich wäre, jederzeit genau zu ermitteln, wie viel Dampf in einer gegebenen Zeit verdichtet worden ist und wie viel Wärme er an das Kühlwasser abgegeben hat; um die latente Wärme der Dämpfe genau

zu bestimmen, hat man also nur einen Destillirapparat so einzurichten, daß sich diese Größen mit Genauigkeit ermitteln lassen. Nach diesem Principe ist in der That die latente Wärme der Dämpfe verschiedener Flüssigkeiten ermittelt worden. Es ist die latente Wärme für den Dampf von

Wasser . . .	540
Alkohol	214
Schwefeläther .	90.

D. h. um ein Pfund dieser Flüssigkeiten bei dem Drucke einer Atmosphäre in Dampf zu verwandeln, wird 540-, 214-, 90mal so viel Wärme gebunden, als nöthig ist, um die Temperatur von 1 Pfund Wasser um 1° zu erhöhen.

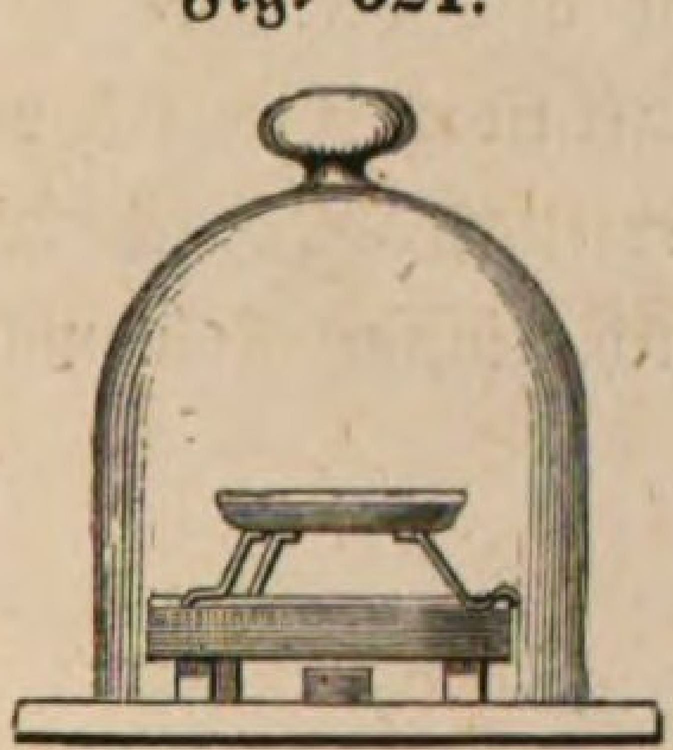
Die latente Wärme der Dämpfe ist nicht für alle Temperaturen dieselbe, sie ist größer für niedrige, geringer für hohe Temperaturen.

Erzeugung von Kälte durch Verdampfung. Wenn eine Flüssigkeit 240 an freier Luft kocht, so behält sie eine constante Temperatur, weil sie von dem Feuer durch die Wände des Gefäßes stets so viel Wärme erhält, als durch die Dampfbildung absorbirt wird. Wenn das Kochen aber unter dem Recipienten der Luftpumpe vor sich geht, so sinkt die Temperatur fortwährend, weil alsdann der Dampf die zu seiner Bildung nöthige latente Wärme aus der Flüssigkeit selbst und aus den umgebenden Körpern nehmen muß.

Gießt man etwas Weingeist oder noch besser Schwefeläther auf die Hand, so fühlen wir eine merkliche Erkaltung, weil die Flüssigkeiten die zu ihrer Verdunstung nöthige Wärme aus der Hand nehmen. — Wenn wir an heißen Tagen in Zugluft treten, so fühlen wir alsbald eine erfrischende Kühle. Es ist dies keineswegs die Folge davon, daß uns der Zug kalte Luft zuführt; die an uns vorüberstreichende Luft mag, wie wir uns durch das Thermometer überzeugen können, sehr warm seyn, der Zug bringt uns doch diese Abkühlung, weil er eine lebhafte Verdunstung auf der Haut erhält. — Wir haben das Gefühl einer drückenden Schwüle, wenn wir uns in einer mit Feuchtigkeit gesättigten windstillen Atmosphäre befinden, in welcher keine Verdunstung an unserm Körper stattfinden kann. Durch die bei rascher Verdampfung stattfindende Wärmebindung erklären sich folgende Versuche.

Gefrieren des Wassers im leeren Raume. Man setzt unter den 241 Recipienten der Luftpumpe ein breites Glasgefäß, welches mit concentrirter Schwefelsäure gefüllt ist. Einige Zoll darüber ist ein ganz dünnes flaches Metallschälchen angebracht, Fig. 521, welches einige Gramme Wasser enthält. Gewöhnlich ist dieses Schälchen an drei Fäden aufgehängt, oder es ruht auf drei feinen Metallfüßen, welche auf dem Rande des unteren Glasgefäßes aufstehen. Wenn man so weit als möglich ausgepumpt hat, und dann einige Minuten wartet, so erscheinen Eisnadeln im Schälchen, und nach einiger Zeit ist die ganze Wassermasse in eine feste Masse verwandelt. Dieser merkwürdige Versuch rührt von Leslie her. Die Schwe-

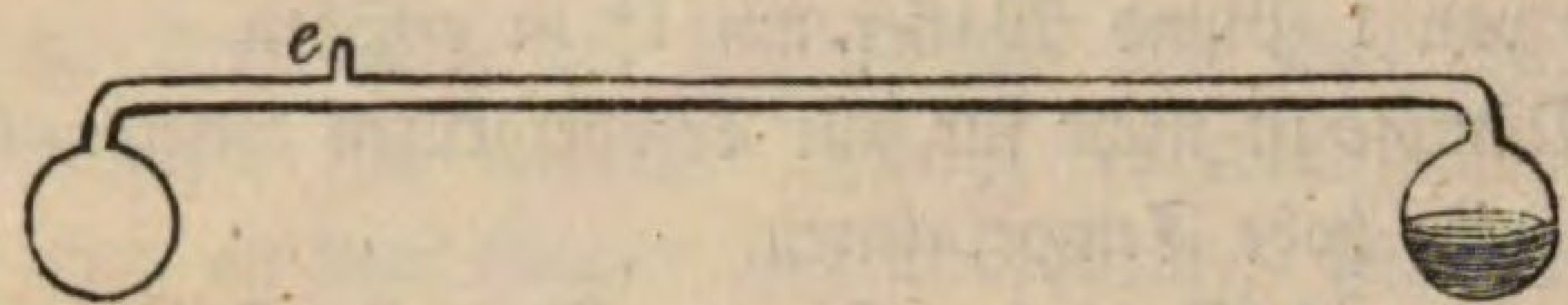
Fig. 521.



felsäure absorbirt den Wasserdampf, sobald er sich bildet, und unterhält dadurch eine rasche Verdunstung. Alle Körper, welche den Wasserdampf stark absorbiren, bringen dieselbe Wirkung hervor. Das Metallschälchen muß sehr dünn seyn, weil es auch an der Erkaltung Theil nehmen muß; es muß von der Umgebung durch schlechte Wärmeleiter isolirt seyn, damit dem Wasser nicht von außen Wärme zugeführt wird.

In Wollaston's Kryophor gefriert das Wasser ebenfalls durch seine eigene Verdampfung. Zwei Glaskugeln, Fig. 522, sind durch eine Röhre verbunden. In jede Kugel wird etwas Wasser gebracht und durch das Kochen desselben alle Luft aus dem Apparate ausgetrieben. Ist dies geschehen, so wird die Oeffnung bei *e* mittelst eines Löthrohrs zugeschmolzen, und so der Apparat luftdicht verschlossen. Wenn man nun alles Wasser in einer Kugel zusammenlaufen läßt und dann die andere Kugel in eine Kältemischung taucht, so wird durch die fortwährend hier erfolgende Verdichtung der Wasserdämpfe in der anderen Kugel eine so rasche Verdunstung hervorgerufen, daß das Wasser gefriert.

Fig. 522.



Auch durch die rasche Verdunstung von Schwefeläther kann man Wasser leicht zum Gefrieren bringen. Man umwickelt zu diesem Zwecke eine mit Wasser gefüllte, etwa 1 Linie weite dünne Glasröhre mit Baumwolle, die man mit Schwefeläther beträufelt. Die so vorgerichtete Röhre bringt man in einem beliebigen Glasgefäße unter die Glocke der Luftpumpe. Beim Evacuiren verdunstet der Aether so rasch, daß das Wasser gefriert.

312 **Gefrieren des Quecksilbers.** Man kann die Erkaltung durch Verdampfen bis zum Gefrierpunkte des Quecksilbers treiben. Zu diesem Zwecke umwickelt man eine Thermometerkugel mit einem Schwämmchen oder einem schwammartigen Gewebe, welches man mit Schwefelkohlenstoff oder noch besser mit flüssiger schwefliger Säure befeuchtet. Die Verdampfung geht so rasch vor sich, und die dadurch weggenommene Wärmemenge ist so bedeutend, daß das Thermometer auf —10°, —20°, —30° fällt und nach einigen Augenblicken das Quecksilber in der Kugel gefriert.

Eine Flüssigkeit verdampft um so rascher, sie erzeugt also bei ihrer Verdampfung eine um so stärkere Kälte, je tiefer ihr Siedepunkt liegt; deshalb wird durch Verdampfen von Schwefeläther eine stärkere Kälte erzeugt als durch Wasser, durch schweflige Säure mehr als durch Aether, durch flüssige Kohlensäure mehr als durch schweflige Säure.

Drittes Kapitel.

Specifische Wärme der Körper.

Mittel, die Wärmemengen zu vergleichen. Wir nehmen als einen 243
für sich selbst einleuchtenden Grundsatz an, daß stets dieselbe Wärmemenge nöthig sey, um dieselbe Wirkung hervorzubringen. Wenn z. B. ein Pfund Eisen von 10° durch irgend eine Ursache bis zu einer Temperatur von 11° erwärmt wird, so ist dazu immer ein und dieselbe Wärmemenge nöthig, mag die Wärme nun von der Sonne oder von einem Heerde kommen, mag sie durch Berührung oder durch Strahlung dem Eisen mitgetheilt werden. Ebenso wird stets dieselbe Wärmemenge nöthig seyn, um 1 Pfund Eis von 0° zu schmelzen, und so ist denn auch stets eine bestimmte Quantität von Wärme nöthig, um 1 Pfund Wasser von 100° zu verdampfen. Die Wärmemengen müssen aber auch dem Gewichte der Substanzen proportional seyn, auf welche sie wirken, um einen bestimmten Effect hervorzubringen, d. h. um die Temperatur von 100 Pfund Eisen von 10° auf 11° zu erhöhen; um 100 Pfund Eis zu schmelzen oder 100 Pfund Wasser zu verdampfen, hat man eine 100mal größere Wärmemenge nöthig, als wenn man dieselben Effecte nur an 1 Pfund dieser Substanzen hervorbringen wollte.

Eine Substanz hat eine größere oder geringere Wärmecapacität, je nachdem eine größere oder geringere Wärmemenge nöthig ist, um eine bestimmte Temperaturveränderung, etwa eine Temperaturerhöhung von 1°, hervorzubringen; die dazu nöthige Wärmemenge aber nennt man die specifische Wärme dieser Substanz. Zwei Körper haben gleiche Wärmecapacitäten, wenn sie bei gleichem Gewichte derselben Wärmemenge bedürfen, damit ihre Temperatur um 1° erhöht wird; dagegen ist die Wärmecapacität des einen Körpers 2mal, 3mal und 4mal so groß als die des anderen, wenn dazu eine 2=, 3=, 4mal größere Wärmemenge nöthig ist.

Aus diesen Definitionen geht hervor, daß ein Körper, dessen Gewicht m und dessen Wärmecapacität c ist, bei einer Temperaturerhöhung oder eine Temperaturerniedrigung von t^0 eine Wärmemenge aufnimmt oder verliert, welche durch das Product mct ausgedrückt ist.

Um die specifische Wärme der Körper zu bestimmen, hat man drei verschiedene Methoden befolgt, nämlich die Methode des Eisschmelzens, die Mischungsmethode und die Erkaltungsmethode.

Nach der Methode des Eisschmelzens wird der Körper, dessen specifische Wärme bestimmt werden soll, gewogen und bis zu einer bestimmten Temperatur erwärmt in ein mit Eisstücken gefülltes Gefäß gebracht. Indem er nun erkaltet, wird ein Theil des Eises geschmolzen; aus der Menge des geschmolzenen Eises

ergiebt sich dann die Quantität der Wärme, welche der Körper verlor, und daraus dann auch seine specifische Wärme.

Die Erkaltungsmethode gründet sich auf folgendes Princip. Wenn ein erwärmter Körper in einen Raum gebracht wird, in welchem er nur durch Strahlung erkalten kann, so wird er unter übrigens gleichen Umständen um so langsamer erkalten, je größer seine specifische Wärme ist.

Die genauesten Resultate liefert die Mischungsmethode, die wir auch etwas näher betrachten wollen. Diese Methode besteht im Wesentlichen darin, daß man eine gewogene Menge des zu untersuchenden Körpers bis auf eine bestimmte Temperatur erwärmt und dann in ein Gefäß mit Wasser eintaucht, dessen Temperatur durch Abkühlung jenes Körpers erhöht wird; kennt man nun die Quantität des Kühlwassers, hat man ermittelt, welche Temperaturerhöhung es durch die Abkühlung des eingetauchten Körpers erleidet, so läßt sich daraus die specifische Wärme dieses Körpers berechnen.

Nehmen wir an, eine 200 Gramme schwere bis zu 100° erwärmte Platinkugel sey in eine 15° warme Wassermasse von 105 Grammen eingetaucht worden und habe sie durch seine Abkühlung auf 20°, also um 5° erwärmt, so ist klar, daß die 200 Gramme Platin um 80° abgekühlt werden mußten, um 105 Gramme Wasser um 5° zu erwärmen. Dieselbe Wärmemenge, welche die Platinkugel abgegeben hat, würde aber demnach auch hingereicht haben, um die Temperatur von 525 Grammen Wasser um 1° zu erhöhen. Wäre die Platinkugel nur 1 Gramm schwer gewesen, so hätte die von ihr bei einer Temperaturerniedrigung von 80° abgegebene Wärmemenge auch nur $\frac{525}{200}$, also nur 2,625 Gramme Wasser um 1° oder 1 Gramm Wasser um 2,625° erwärmen können. Daraus geht aber hervor, daß dieselbe Wärmemenge, welche die Temperatur von 1 Gramm Platin um 80° erhöht, die Temperatur einer gleichen Wassermasse nur um 2,625° erhöhen kann, das Platin bedarf also nur $\frac{2,625}{80}$, also 0,0328mal weniger Wärme, um eine gleiche Temperaturerhöhung zu erfahren wie eine gleiche Wassermasse; die specifische Wärme des Platins ist demnach 0,0328.

Bezeichnen wir mit m das Gewicht und mit t die Temperaturerhöhung des Kühlwassers (in dem eben berechneten Beispiele 105 Gramme und 5°), mit m' und t' das Gewicht und die Temperaturerniedrigung des abgekühlten Körpers (in unserem Beispiele 200 Gramme Platin und 80°), so ergiebt sich aus der eben für einen concreten Fall durchgeführten Betrachtungsweise für die Berechnung der specifischen Wärme c des abgekühlten Körpers folgende Formel:

$$c = \frac{m \cdot t}{m't'},$$

das heißt in Worten, man findet die specifische Wärme des abgekühlten Körpers, wenn man sein Gewicht mit seiner Temperaturerniedrigung multiplicirt und mit diesem Producte in das Product dividirt, welches man erhält, wenn das Gewicht des Kühlwassers mit seiner Temperaturerhöhung multiplicirt wird.

Resultate der Versuche über die specifische Wärme. Die Be- 244
stimmung der specifischen Wärme erhielt durch die Arbeiten von Dulong und Petit eine große Wichtigkeit für die Chemie, indem sie fanden, daß das Product, welches man erhält, wenn man die specifische Wärme eines Elementes mit seinem Atomgewichte multiplicirt, stets denselben Werth habe. So fanden sie z. B. die specifische Wärme des Eisens gleich 0,1100; das Atomgewicht dieses Metalls ist aber 339,2, und das Product dieser beiden Größen ist gleich 37,31. Multiplicirt man die specifische Wärme des Kupfers 0,0949 mit seinem Atomgewichte 395,7, so erhält man das Product 37,55, einen Werth, welcher mit dem für das Eisen gefundenen fast vollkommen übereinstimmt. Ebenso fand sich, daß dieses Product für alle metallischen Elemente fast genau denselben Werth habe, es schien also das Gesetz begründet zu seyn, daß die specifische Wärme der metallischen Elemente ihrem Atomgewichte umgekehrt proportional sey.

Dadurch war nun ein Mittel mehr gegeben, das Atomgewicht eines Körpers kennen zu lernen und die Werthe der auf anderem Wege gefundenen Atomgewichte zu controliren. Die Atomgewichte der Elemente waren zu der Zeit, wo Dulong und Petit diese Arbeiten ausführten, noch nicht so fest bestimmt als jetzt; oft hatte man für denselben Körper unter mehreren Atomgewichten zu wählen, und Dulong und Petit wählten natürlich das mit ihrem Gesetze am besten harmonirende.

Später wurden die Atomgewichte auf anderem Wege genauer bestimmt, aber das Dulong'sche Gesetz stellte sich dadurch nicht noch evidenter heraus, im Gegentheile ergaben sich Abweichungen, welche dem Gesetze gerade zu widersprechen schienen. Durch die neuesten Untersuchungen Regnault's über die specifische Wärme ist jedoch die Richtigkeit des Gesetzes außer Zweifel gestellt.

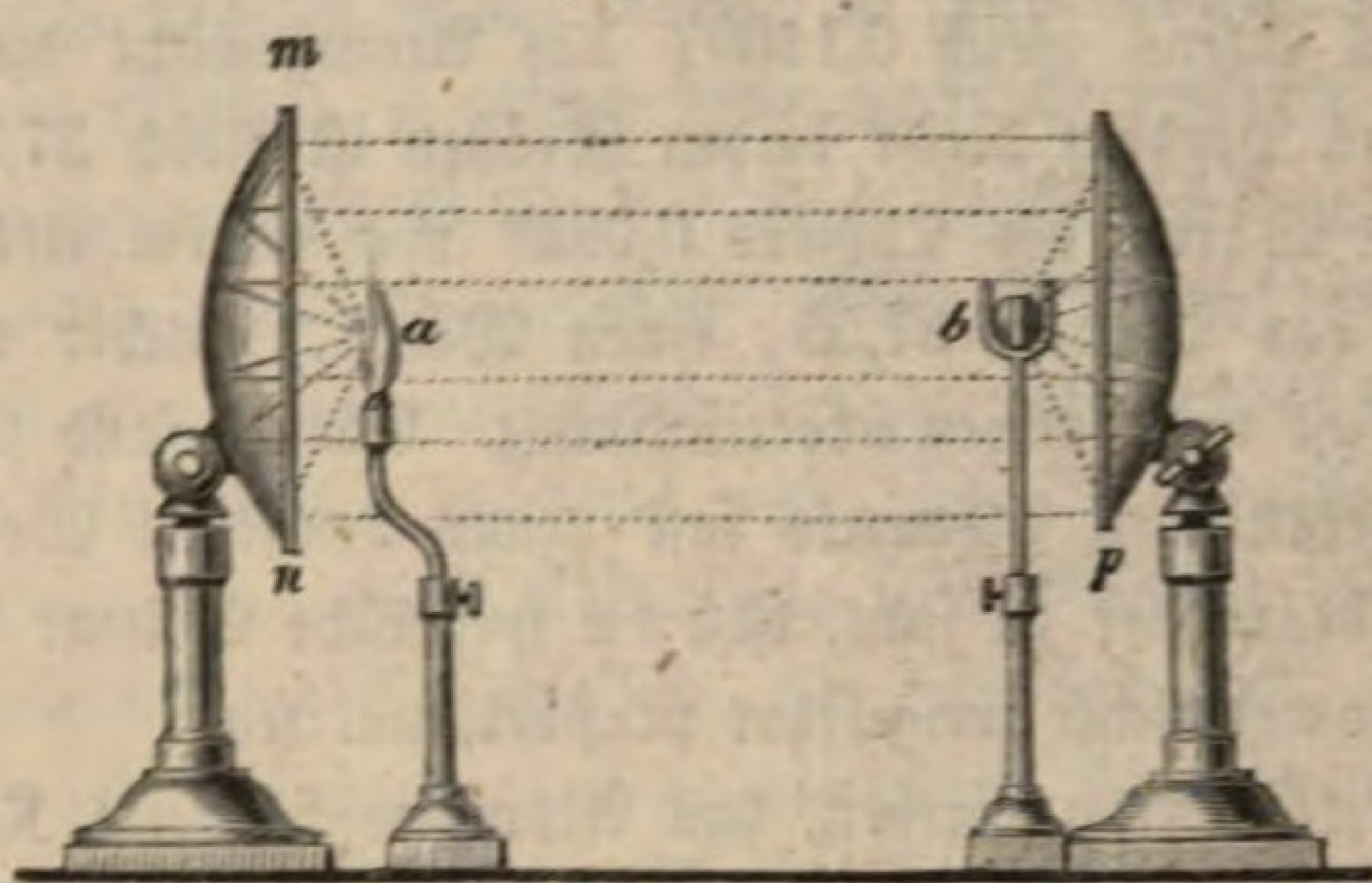
Viertes Kapitel.

Fortpflanzung der Wärme.

Existenz der strahlenden Wärme. Die strahlende Wärme durch- 245
dringt gewisse Körper in derselben Weise, wie das Licht durch die durchsichtigen Körper hindurchgeht; die Sonnenstrahlen z. B. treffen unsere Erde, nachdem sie die ganze Atmosphäre durchdrungen haben, sie erwärmen die Erdoberfläche, während die höheren Regionen der Luft kalt bleiben; die Wärmestrahlen gehen also größtentheils durch die Atmosphäre hindurch, ohne von ihr absorbirt zu werden. Wenn man sich dem Feuer eines Heerdes nähert, so empfindet man eine brennende Hitze, und doch ist die Luft zwischen uns und dem Feuer nicht bis zu einem solchen Grade erwärmt; denn wenn man einen Schirm vorhält, verschwin-

det diese Hitze augenblicklich, was unmöglich wäre, wenn wirklich die ganze uns umgebende Luftmasse eine so hohe Temperatur hätte. Heiße Körper können also nach allen Seiten hin Wärme aussenden, welche durch die Luft hindurchgeht wie die Lichtstrahlen durch durchsichtige Körper; man spricht deshalb von strahlender Wärme und von Wärmestrahlen, wie man von Lichtstrahlen spricht.

Fig. 523.



Wenn man zwei große sphärische oder parabolische Hohlspiegel von polirtem Messingblech, Fig. 523, 5 bis 6 Meter von einander entfernt so aufstellt, daß die Axen beider Spiegel in eine Linie zusammenfallen, wenn man alsdann in den Brennpunkt des einen Spiegels ein Stück Zunder, in den Brennpunkt des anderen aber eine fast weißglühende Eisenkugel oder eine glühende Kohle bringt, deren Verbrennung man durch einen Blasebalg lebhaft unterhält, so wird sich der Zunder alsbald entzünden, als ob er mit dem Feuer in Berührung wäre. Dieser Versuch zeigt, daß der glühende Körper Wärmestrahlen aussendet; denn es ist klar, daß der Zunder nicht etwa dadurch angezündet wurde, daß die zwischenliegenden Luftschichten allmälig so stark erhitzt worden sind. Bringt man den Zunder aus dem Brennpunkte weg, so wird er nicht mehr entzündet, wenn man ihn auch dem glühenden Körper weit näher bringt.

Bringt man an die Stelle der glühenden Kugel eine Kugel von 300° und an die Stelle des Zunders ein gewöhnliches Thermometer, so wird das Thermometer rasch steigen; also auch die Kugel von 300° sendet Wärmestrahlen aus.

Wenn man die 300° heiße Kugel mit einem Gefäße voll kochenden Wassers oder mit Wasser von 90°, 80° oder 70° vertauscht, so beobachtet man vielleicht gar keine Temperaturerhöhung mehr am Thermometer; dies beweist aber noch nicht, daß die Wände des Gefäßes bei dieser Temperatur keine Wärme mehr ausstrahlen, sondern nur, daß hier das gewöhnliche Thermometer nicht empfindlich genug ist. Man muß deshalb empfindlichere Instrumente zu Hülfe nehmen, etwa ein Luftthermometer, Rumford's oder Leslie's Differentialthermometer oder Melloni's Thermomultiplicator.

Fig. 524.

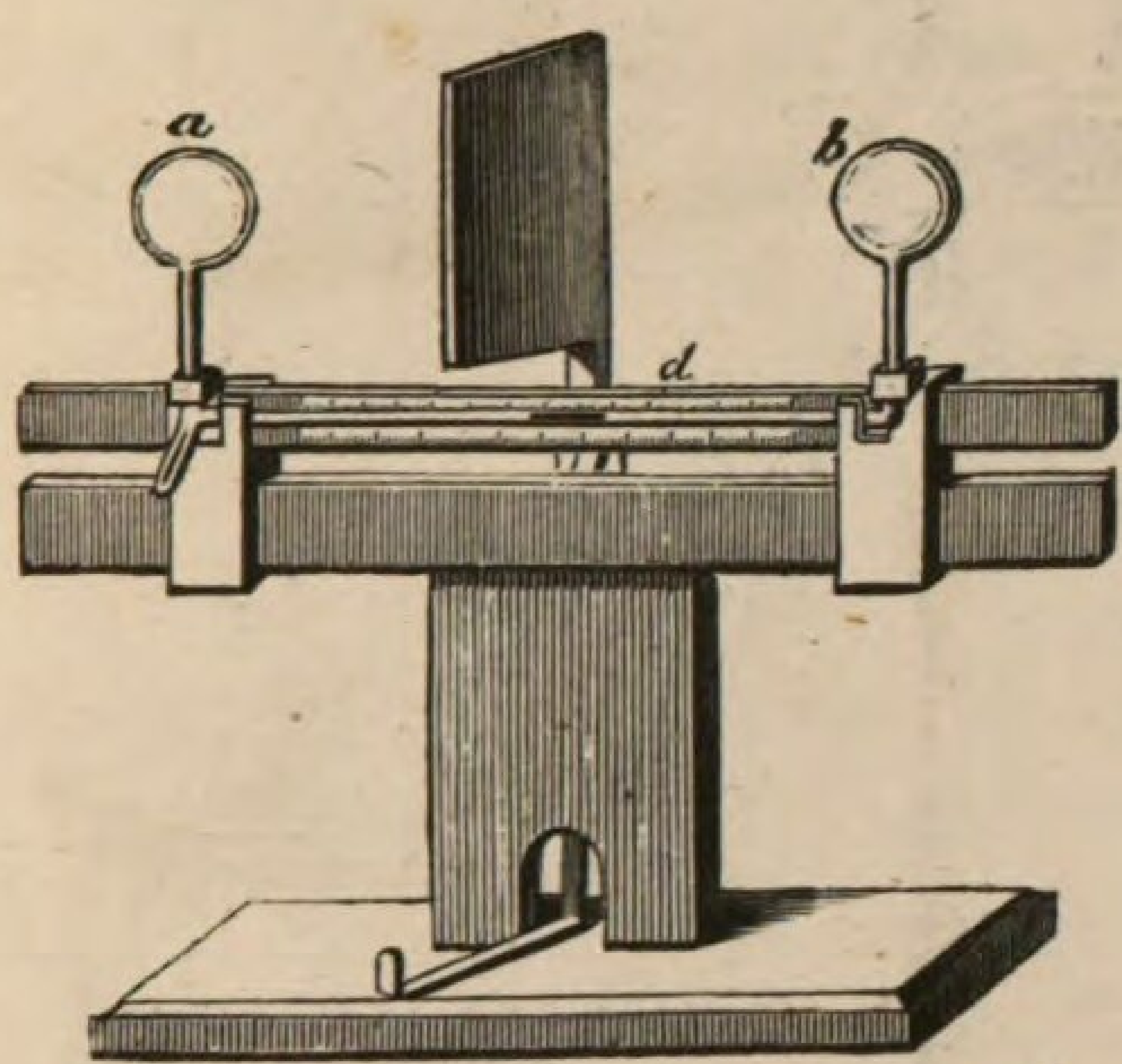


Ein Luftthermometer kann man zu diesem Zwecke etwa so construiren, wie Fig. 524 zeigt. Eine Kugel von 3 bis 4 Centimeter Durchmesser ist an dem Ende einer Röhre angeblasen, deren Durchmesser ungefähr 1 Millimeter beträgt; diese Röhre ist gekrümmt, wie man in der Figur sieht, und hat in der Mitte

eine zweite Kugel, an ihrem anderen Ende einen Trichter, damit die von *c* bis *d* stehende Flüssigkeit weder in die untere Kugel zurücksteigen, noch oben auslaufen kann. Wenn die Dimensionen des Instrumentes bekannt sind, so kann man wohl ungefähr seine Empfindlichkeit berechnen, graduiren kann man es jedoch nicht, weil ja die Flüssigkeit dem atmosphärischen Drucke ausgesetzt bleibt und weil aus der unteren Kugel Luft bald aus-, bald eintritt.

Rumford's Differentialthermometer, Fig. 525, besteht aus zwei Glaskugeln, *a* und *b*, welche durch eine gebogene Glasröhre, deren horizontaler Theil 5 bis 6 Decimeter lang ist, verbunden sind. In dieser Röhre befindet sich ein Index von Alkohol oder Schwefelsäure, auf welchen von beiden Seiten die Luft der Kugeln drückt; er wird also nur dann an einer bestimmten Stelle stehen bleiben, wenn der Druck von beiden Seiten gleich ist. Wird die eine Kugel mehr erwärmt als die andere, so wird der Index gegen die kältere Kugel hingetrieben.

Fig. 525.



Leslie's Differentialthermometer, Fig. 526, ist auf ähnliche Weise construirt, nur sind seine Kugeln in der Regel etwas kleiner, die vertikalen Arme der sie verbindenden Röhre sind länger und stehen einnander näher.

Melloni's Thermomultiplicator besteht aus einer thermoelektrischen Säule, Fig. 527, wie sie schon früher beschrieben wurde, und aus einem

Fig. 526.

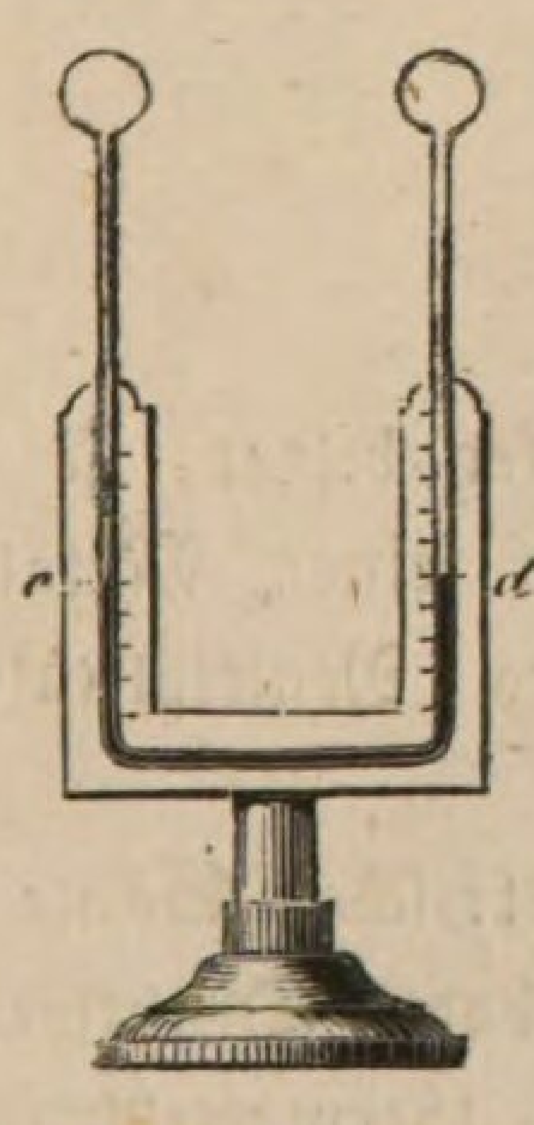
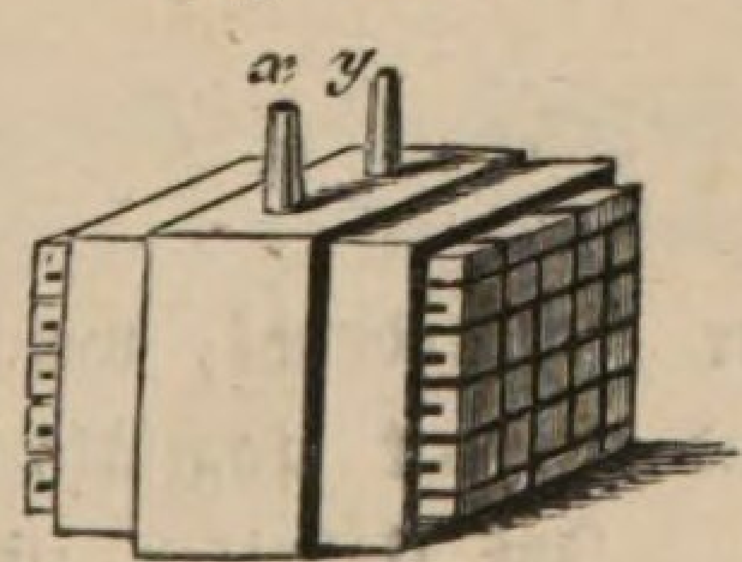


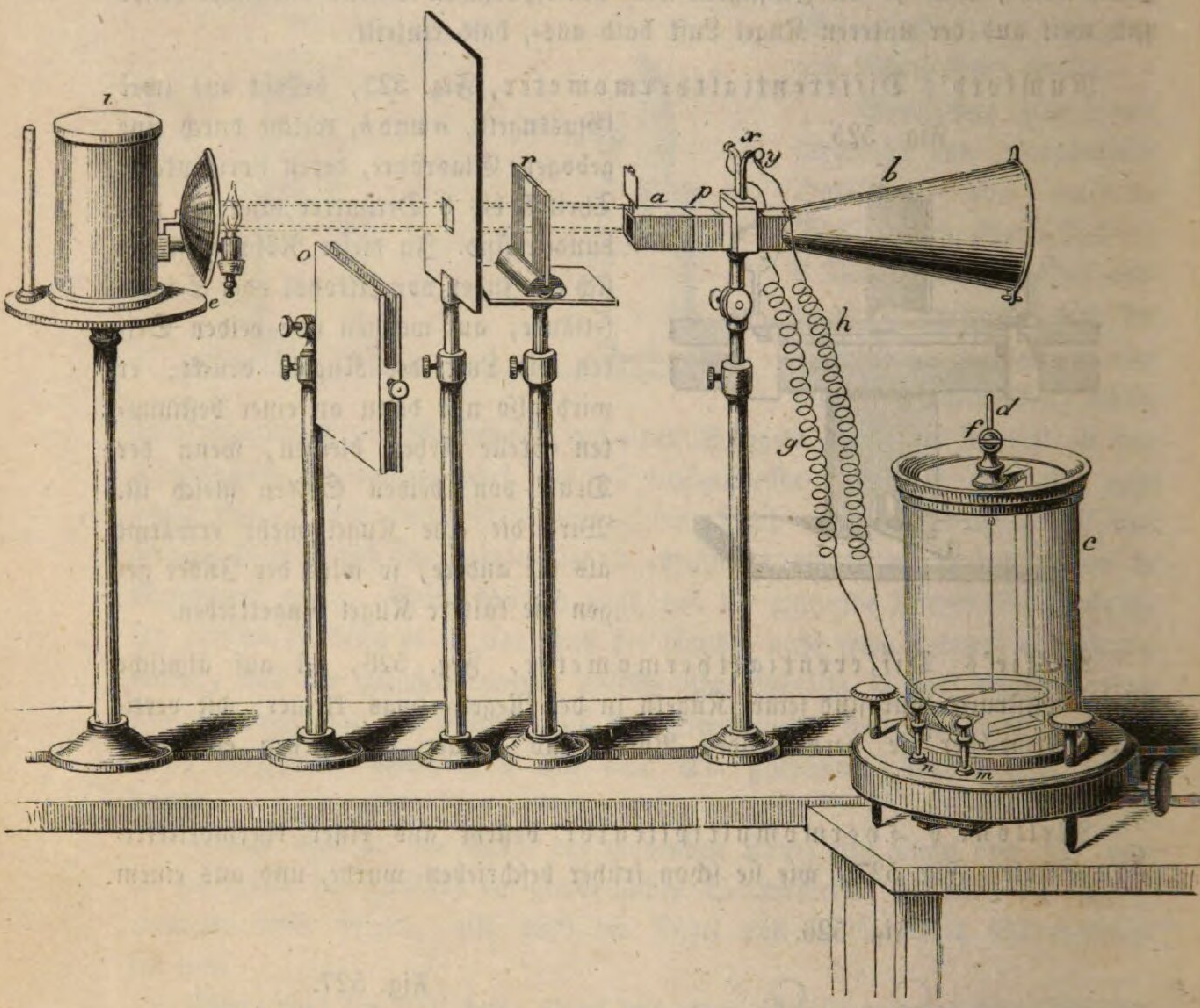
Fig. 527.



ehr empfindlichen Multiplicator. Die Säule ist sorgfältg an beiden Enden mit Ruß geschwärzt und mit ihrer Fassung bei *p*, Fig. 528 (s. f. S.), auf ein Stativ gebracht; die Hülsen *a* und *b* dienen dazu, die Luftströmungen und die Seitenstrahlungen von der Säule abzuhalten; da die Hülse *b* konisch ist, so dient sie auch, um

von dieser Seite her die Wärmestrahlen mehr zu concentriren, wenn es nöthig

Fig. 528.



ist. Der Kupferdraht, welcher das Galvanometer bildet, ist 7 bis 8 Meter lang und ist mit ungefähr 40 Windungen auf einen Metallrahmen aufgewunden. Im Uebrigen ist die Einrichtung des Multiplicators bereits bekannt.

Um die Verbindung zwischen der thermoelektrischen Säule und dem Multiplicator herzustellen, dienen die leicht ausdehnbaren Drahtspiralen *g* und *h*, welche bei *x* und *y* mit den beiden Enden der thermoelektrischen Säule, bei *m* und *n* mit den Enden des Multiplicatordrahtes in leitender Verbindung stehen. Die geringste Temperaturdifferenz zwischen den beiden geschwärzten Enden der Säule bewirkt nun schon eine Ablenkung der Nadel, die man auf dem getheilten Kreise ablesen kann.

Wärmestrahlungsvermögen der Körper. Das Vermögen der Kör- 246
per, die Wärme auszustrahlen, ist sehr ungleich und hängt wesentlich von dem Zustande der Oberflächen ab; im Allgemeinen strahlen die Oberflächen der weniger dichten Körper unter sonst gleichen Umständen mehr Wärme aus als die Oberflächen dichter Körper. Die Ungleichheit des Strahlungsvermögens verschiedener Oberflächen hat Leslie folgendermaßen nachgewiesen: Er brachte in den Brennpunkt des einen Hohlspiegels, Fig. 523, die eine Kugel seines Differentialthermometers, in den Brennpunkt des anderen aber einen hohlen mit heißem Wasser gefüllten Würfel von Messingblech, dessen Seite 15 bis 18 Centimeter lang war; die eine Seitenfläche dieses Würfels war mit Ruß überzogen, eine andere polirt; wurde nun die polirte Fläche dem Spiegel zugekehrt, so war die Wirkung auf das Differentialthermometer bei Weitem geringer, als wenn man die berußte Fläche dem Spiegel zukehrte; die mit Ruß geschwärzte Fläche strahlt also mehr Wärme aus als die polirte Metallfläche.

Diese Methode ist zwar ganz geeignet, um die Unterschiede im Strahlungsvermögen sichtbar zu machen; um aber genauere Vergleichungen anzustellen, ist Melloni's Verfahren bei Weitem vorzüglicher; er stellte in passender Entfernung von der Thermosäule einen Hohlwürfel von Messingblech auf, dessen Seite 7 bis 8 Centimeter lang und welcher mit heißem Wasser gefüllt war, welches durch eine Weingeistlampe auf constanter Temperatur erhalten wurde; die Seitenflächen dieses Würfels waren auf verschiedene Weise präparirt, nämlich eine mit Ruß, eine mit Bleiweiß, eine mit Tusch überzogen und eine polirt. Je nachdem die eine oder die andere Seitenfläche dem Thermomultiplicator zugekehrt ist, sind die Ablenkungen der Nadel sehr ungleich; aus den beobachteten Ablenkungen ergiebt sich dann ohne Weiteres das Verhältniß, in welchem die Emissionsfähigkeit der verschiedenen Flächen zu einander steht. Auf diese Weise wurde das Ausstrahlungsvermögen folgender Körper bestimmt:

Kienruß	100	Tusch	85
Bleiweiß	100	Metallfläche . .	12.

Wenn man also mit 100 das Ausstrahlungsvermögen des Kienrußes bezeichnet, so ist das Ausstrahlungsvermögen einer polirten Metallfläche gleich 12, also nur $\frac{12}{100}$ von dem der Kienrußfläche.

Absorption der Wärmestrahlen. Jeder Körper hat das Vermögen, 247
Wärmestrahlen, die, von einem anderen Körper kommend, ihn treffen, mehr oder weniger zu absorbiren; dies ergiebt sich schon aus den eben besprochenen Versuchen; denn die Körper erwärmen sich in dem Brennpunkte des einen Hohlspiegels nur deshalb, weil sie die Wärmestrahlen absorbiren, welche durch die Spiegel auf ihnen concentrirt werden. Daß dies Vermögen aber allen Körpern zukommt, ergiebt sich daraus, daß alle, den Sonnenstrahlen ausgesetzt, eine Temperatur annehmen, welche höher ist als die Temperatur der Luft.

Das Absorptionsvermögen ist nicht für alle Körper gleich, was schon daraus hervorgeht, daß sie nicht gleiches Emissionsvermögen haben; denn eine Oberfläche, welche leicht Wärmestrahlen aussendet, muß umgekehrt auch die Fähigkeit haben, diese Strahlen einzusaugen. Die Ungleichheit des Absorptionsvermögens läßt sich schon durch einen einfachen Versuch zeigen: Man setze nur ein Thermometer, dessen Kugel geschwärzt ist, den Sonnenstrahlen aus, so wird es weit höher steigen als ein anderes, dessen Kugel nicht geschwärzt ist; die geschwärzte Oberfläche der einen Thermometerkugel absorbirt also offenbar mehr Wärmestrahlen als die glänzende Oberfläche der anderen.

Die von einem Körper absorbirten Wärmestrahlen sind es also, welche ihn erwärmen; wenn demnach ein Körper durch Wärmestrahlung möglichst stark erwärmt werden soll, so muß man ihn mit einem Ueberzuge versehen, welcher die Wärmestrahlen stark absorbirt; man überzieht deshalb auch alle Thermoskope, welche dazu dienen sollen, die Wirkungen der Wärmestrahlung recht merklich zu machen, die Kugeln der Differentialthermometer, die beiden Enden der thermoelektrischen Säule mit Ruß, weil dieser unter allen bekannten Körpern das stärkste Absorptionsvermögen hat.

Wir haben oben gesehen, daß metallische Oberflächen nur ein sehr geringes Emissionsvermögen besitzen, und daraus folgt, daß sie die Wärmestrahlen auch nur in einem sehr geringen Maaße einzusaugen im Stande sind.

248 **Reflexion und Diffusion der Wärmestrahlen.** Im Allgemeinen haben die Körper die Fähigkeit, einen Theil der sie treffenden Wärmestrahlen ganz in der Weise zurückzuwerfen, wie auch die Lichtstrahlen regelmäßig oder unregelmäßig reflectirt werden. Die Spiegel, die uns zu den obigen Versuchen dienten, geben uns einen entscheidenden Beweis für die Reflexion der Wärmestrahlen; denn sie erwärmen sich selbst bei dem Versuche mit dem Zunder nicht. Ein einfacher Schluß überzeugt uns, daß die meisten Körper dieses Reflexionsvermögen besitzen müssen und daß es dem Absorptionsvermögen so zu sagen complementär ist; denn die Summe der absorbirten und der reflectirten Wärmestrahlen muß doch offenbar der Gesammtheit der einfallenden Strahlen gleich seyn, vorausgesetzt, daß der Körper keine Wärmestrahlen durchläßt. Wenn also das Reflexionsvermögen größer ist, so ist das Absorptionsvermögen geringer, und umgekehrt. Ein Körper, der gar keine Wärmestrahlen reflectirt, muß alle Strahlen absorbiren, wie dies in der That bei solchen Oberflächen der Fall ist, die man sorgfältig mit Ruß überzogen hat; polirte Metallflächen dagegen, welche ein großes Reflexionsvermögen besitzen, absorbiren nur sehr wenig Wärmestrahlen.

Die Wärmestrahlen werden ganz nach denselben Gesetzen reflectirt wie die Lichtstrahlen, d. h. der Reflexionswinkel ist dem Einfallswinkel gleich; dies geht schon aus den Versuchen mit den Hohlspiegeln hervor, da ja die Brennpunkte für die Wärmestrahlen mit denen der Lichtstrahlen zusammenfallen.

So wie an der Oberfläche eines nicht ganz vollständig polirten Körpers Lichtstrahlen nach allen Seiten unregelmäßig zerstreut werden, so erleiden auch

die Wärmestrahlen an der Oberfläche der meisten Körper eine Diffusion. Man kann sich davon durch folgenden Versuch überzeugen. Man lasse durch eine Oeffnung in dem Laden eines dunklen Zimmers Sonnenstrahlen auf eine der Oeffnung gegenüberliegende Wand fallen, so wird der erleuchtete Fleck derselben, welcher von allen Seiten her sichtbar ist, weil er das Sonnenlicht nach allen Seiten hin zerstreut, auch die Wärmestrahlen unregelmäßig zerstreuen, also nach allen Seiten hin Wärmestrahlen aussenden, als ob er selbst eine Wärmequelle wäre. Diese Diffusion der Wärmestrahlen wird sichtbar, wenn man dem hellen Flecke die thermoelektrische Säule zukehrt; man erhält einen Ausschlag der Nadel, an welcher Stelle des Zimmers man auch das Instrument aufstellen mag; die Wirkung kann also nicht von einer regelmäßigen Reflexion herrühren; daß sie aber auch nicht die Folge einer Erwärmung der von den Sonnenstrahlen beschienenen Stelle der Wand ist, geht daraus hervor, daß die Nadel auf der Stelle wieder auf den Nullpunkt der Theilung zurückgeht, sobald man die Oeffnung im Laden verschließt.

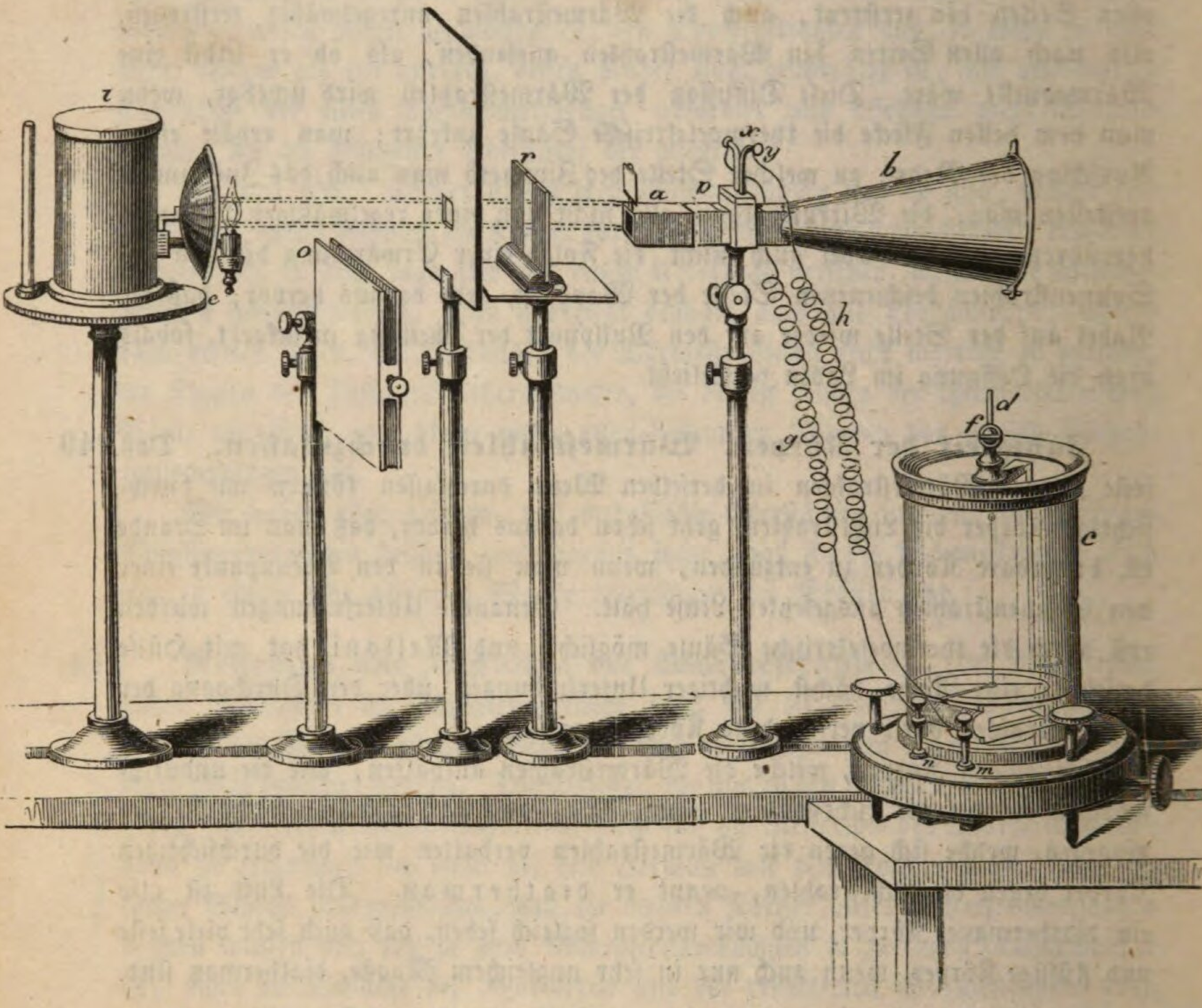
Fähigkeit der Körper, Wärmestrahlen durchzulassen. Daß 249
feste Körper Wärmestrahlen in derselben Weise durchlassen können wie durchsichtige Körper die Lichtstrahlen, geht schon daraus hervor, daß man im Stande ist, brennbare Körper zu entzünden, wenn man sie in den Brennpunkt einer den Sonnenstrahlen ausgesetzten Linse hält. Genauere Untersuchungen wurden erst durch die thermoelektrische Säule möglich, und Melloni hat mit Hülfe derselben eine Reihe höchst wichtiger Untersuchungen über den Durchgang der Wärmestrahlen durch verschiedene Körper angestellt.

Diejenigen Körper, welche die Wärmestrahlen aufhalten, wie die undurchsichtigen Körper die Lichtstrahlen, nennt Melloni atherman; solche Körper hingegen, welche sich gegen die Wärmestrahlen verhalten wie die durchsichtigen Körper gegen die Lichtstrahlen, nennt er diatherman. Die Luft ist also ein diathermaner Körper, und wir werden sogleich sehen, daß auch sehr viele feste und flüssige Körper, wenn auch nur in sehr ungleichem Maaße, diatherman sind.

Die Versuche werden in folgender Weise angestellt. Die Wärmequelle, etwa eine kleine Oellampe, oder ein mit heißem Wasser gefüllter Hohlwürfel von Messingblech, an welchem eine Seite berußt ist, damit sie die Wärme besser ausstrahlt, wird so gestellt, daß sie eine Ablenkung der Nadel von 30° hervorbringt; werden nun die Wärmestrahlen durch eine bei *r*, Fig. 529 (s. f. S.), aufgestellte Platte des zu untersuchenden Körpers aufgefangen, so geht die Nadel bald mehr, bald weniger zurück, und so ergiebt sich, daß gleich dicke und gleich durchsichtige Platten verschiedener Körper nicht gleiche Mengen strahlender Wärme durchlassen. Bewirkt z. B. die freie Strahlung der Wärmequelle eine Ablenkung von 30°, so wird die Nadel auf 28° zurückgehen, wenn man eine 3 bis 4 Millimeter dicke Steinsalzplatte bei *r* aufstellt, während eine gleich dicke Quarzplatte die Nadel auf 15 bis 16° zurückgehen macht; das Steinsalz läßt also die Wärmestrahlen bei Weitem besser durch als der Bergkrystall. Manche

weniger durchsichtige Körper lassen sogar die Wärmestrahlen besser durch als andere, die ganz durchsichtig sind. Während z. B. eine ganz durchsichtige Alaunplatte die Ablenkung der Nadel von 30° auf 3 bis 4° reducirt, bringt eine noch

Fig. 529.



weit dickere Platte von Rauchtopas die Nadel nur auf 14 bis 15° zurück. Ja mancher fast ganz undurchsichtige Körper, wie schwarzes Glas und schwarzer Glimmer, lassen noch ziemlich viele Wärmestrahlen durch.

Läßt man die Wärmestrahlen, welche durch eine Glasplatte gegangen sind, auf eine Alaunplatte fallen, so werden sie gänzlich absorbirt, während doch eine Alaunplatte fast alle Wärmestrahlen durchläßt, welche zuvor durch eine Platte von Citronensäure gegangen sind. Diese Erscheinung hat die größte Aehnlichkeit mit dem Durchgange des Lichts durch gefärbte Mittel; Lichtstrahlen, welche durch ein grünes Glas gegangen sind, werden bekanntlich von anderen grünen Gläsern leicht durchgelassen, sie werden aber absorbirt, wenn man sie auf ein rothes Glas fallen läßt; die Unterschiede zwischen den Wärmestrahlen sind also den Verschiedenheiten der Farben beim Lichte ganz analog.

Aehnliche Beziehungen hat man auch in Beziehung auf das Emissionsvermögen und Absorptionsvermögen der Körper bemerkt.

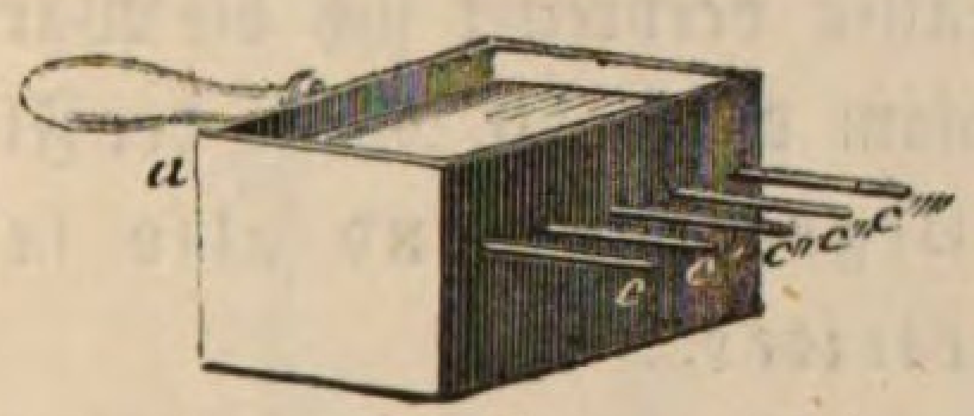
Die Wärmestrahlen sind brechbar wie die Lichtstrahlen, wie sich dies am besten mit Hülfe eines Prismas von Steinsalz nachweisen läßt. Auch Polarisationserscheinungen hat man bei den Wärmestrahlen nachgewiesen.

Verbreitung der Wärme durch Leitung. Nicht allein durch 250
Strahlung, sondern auch bei unmittelbarer Berührung kann die Wärme von einem Körper zum anderen übergehen und sich alsdann durch seine ganze Masse hindurch verbreiten; doch findet in Beziehung auf die Leichtigkeit, mit welcher die Wärme in einen Körper übergeht und sich durch seine Masse verbreitet, eine große Ungleichheit zwischen verschiedenen Körpern Statt; in manchen verbreitet sich die Wärme außerordentlich leicht, während in anderen dieselbe weniger leicht von einem Theilchen zum anderen übergeht. Ein Schwefelhölzchen, welches an einem Ende brennt, kann man am anderen Ende noch zwischen den Fingern halten, ohne nur eine Temperaturerhöhung des Holzes zu fühlen; die hohe Temperatur des brennenden Endes theilt sich also nicht so leicht der übrigen Masse des Holzes mit, das Holz ist ein schlechter Wärmeleiter; einen gleichlangen Metalldraht aber, den man an dem einen Ende glühend gemacht hat, kann man am anderen Ende nicht anfassen, ohne sich zu verbrennen, die Wärme verbreitet sich also leicht von dem glühenden Ende aus durch das ganze Stäbchen, das Metall ist also ein guter Wärmeleiter.

Ein Stück Eisen und ein Stück wollenes Tuch, welche eine kalte Winternacht hindurch im Freien lagen, haben gewiß eine gleich niedrige Temperatur, und doch fühlt sich das Eisen ungleich kälter an, weil es der Hand die Wärme ungleich rascher entzieht als die Wolle.

Um zu zeigen, wie ungleich die Fähigkeit verschiedener Körper ist, die Wärme fortzuleiten, kann man den Fig. 530 dargestellten, von Ingenhouß angegebenen Apparat anwenden. In die eine Seitenwand eines Kastens von Blech sind mehrere, aus den zu vergleichenden Substanzen verfertigte Stäbchen eingesteckt, welche sämmtlich gleichen Durchmesser haben müssen und sämmtlich mit einer Schicht von Wachs überzogen sind; wenn man nun kochendes Wasser oder heißes Oel in den Kasten gießt, so wird die Wärme auch mehr oder weniger weit in die Stäbchen vordringen und den Wachsüberzug schmelzen. Nehmen wir an, das eine Stäbchen sey von Kupfer, eines von Eisen, ein drittes von Blei, das vierte von Glas, das letzte von Holz, so wird die Wachsschicht des Kupferstäbchens schon vollständig bis ans Ende geschmolzen seyn, während bei allen anderen Stäbchen die Schmelzung des Wachses noch nicht so weit vorgeschritten ist; das Kupfer ist also unter diesen fünf Körpern der beste Wärmeleiter. Für das Eisenstäbchen schreitet die Schmelzung des Wachses rascher voran als für das Bleistäbchen, und während das Wachs auf dem Kupferstabe ganz weggeschmolzen ist, ist die Wachsschicht auf dem Glasstabe nur auf eine sehr

Fig. 530.



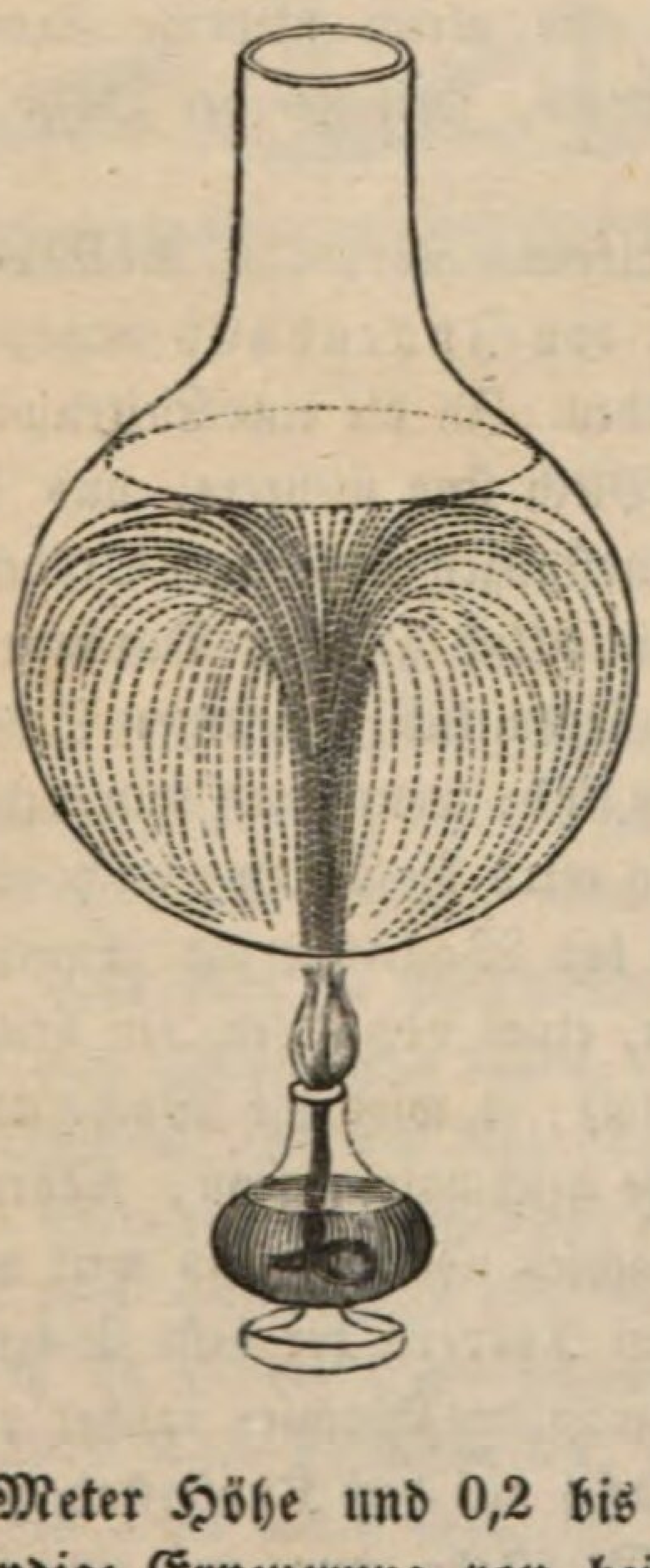
unbedeutende Strecke geschmolzen, an dem Holzstäbchen ist aber kaum ein Anfang des Schmelzens wahrzunehmen, das Holz ist also in der That unter diesen Körpern der schlechteste Wärmeleiter.

Unter allen Körpern sind die Metalle die besten, Asche, Seide, Haare, Stroh, Wolle u. s. w., überhaupt die lockeren Körper, die schlechtesten Wärmeleiter.

Im praktischen Leben machen wir von der guten oder schlechten Wärmeleitungsfähigkeit verschiedener Körper zahlreiche Anwendungen. Gegenstände, die man vor der Erkaltung schützen will, umgiebt man mit schlechten Wärmeleitern; man umwickelt Bäume und Sträuche des Winters mit Stroh, um sie vor dem Erfrieren zu schützen; unsere Kleider halten warm, weil sie aus schlechten Wärmeleitern verfertigt sind. In einem kupfernen Gefäße bringt man unter sonst gleichen Umständen eine Flüssigkeit weit eher ins Kochen als in einem Porcellangefäße von derselben Wanddicke.

251 **Wärmeleitungsfähigkeit der Flüssigkeiten und Gase.** In den Flüssigkeiten verbreitet sich die Wärme meistens durch Strömungen, welche dadurch entstehen, daß die erwärmten Theilchen wegen ihrer geringeren Dichtigkeit immer in die Höhe steigen. Man kann diese Strömungen leicht sichtbar machen, wenn man Sägespäne in Wasser wirft, welches sich in einem Glasgefäße befindet, und dann von unten her langsam erwärmt, Fig. 531. Man sieht, wie die Strömung in der Mitte aufwärts, an der Seite abwärts gerichtet ist. Wenn man eine Flüssigkeit von oben her erwärmt, so daß das hydrostatische Gleichgewicht nicht gestört wird, so kann sich die Wärme nur in derselben Weise durch die Masse der Flüssigkeit verbreiten, wie dies bei festen Körpern der Fall ist, nämlich durch Leitung, indem die Wärme von einer Schicht zur anderen übergeht. In solchen Fällen verbreitet sich die Wärme aber nur sehr langsam durch die Masse der Flüssigkeit, die **Flüssigkeiten sind also sehr schlechte Wärmeleiter.**

Fig. 531.



Um sich von der schlechten Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten zu überzeugen, braucht man nur die Kugel eines Thermometers in kaltes Wasser zu tauchen und dann heißes Oel auf das Wasser zu gießen; man wird selbst in den obersten Wasserschichten kaum eine Temperaturerhöhung wahrnehmen können.

Despretz hat die Leitungsfähigkeit des Wassers bestimmt, indem er Wassersäulen von 1 Meter Höhe und 0,2 bis 0,4 Meter Durchmesser von oben her durch beständige Erneuerung von heißem Wasser erwärmte. Es dauerte ungefähr 30

Stunden, bis die Temperatur der Wassersäule an allen Stellen stabil wurde. Aus diesen Versuchen folgt, daß die Wärmeleitungsfähigkeit des Wassers ungefähr 96mal geringer ist als die des Kupfers.

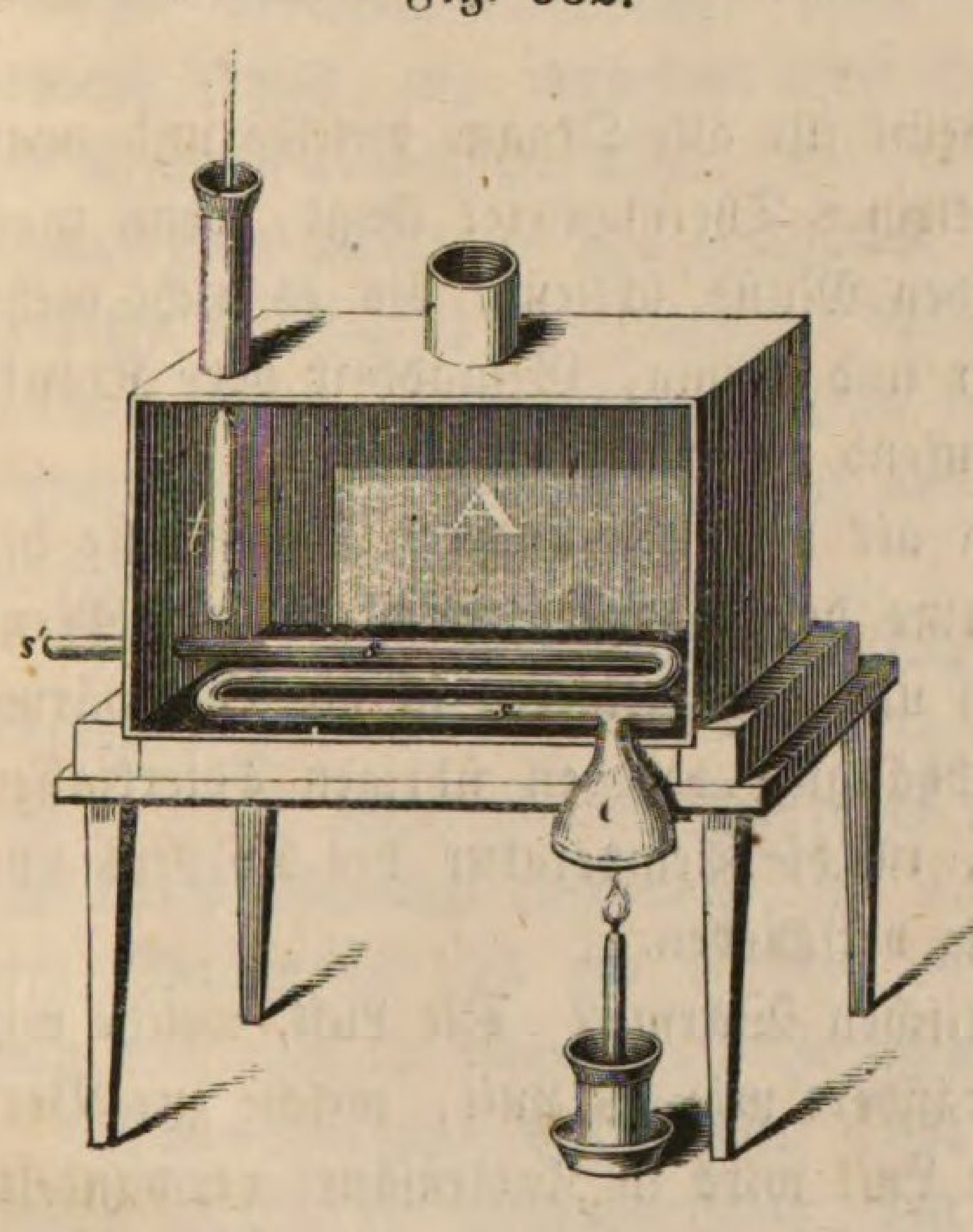
Die Luft und die Gase überhaupt sind ebenfalls sehr schlechte Wärmeleiter, doch läßt sich ihr Wärmeleitungsvermögen durch Thermometer, die man etwa in verschiedenen Schichten der zu untersuchenden Luftmasse anbringen wollte, wegen der Wärmestrahlung nicht ermitteln. Daß jedoch die Gase überhaupt, und die Luft insbesondere schlechte Wärmeleiter sind, geht daraus hervor, daß Körper, welche von allen Seiten von Luftschichten umgeben sind, nur sehr langsam erwärmt und erkaltet werden können, wenn nur der Wechsel der Luftschichten verhindert wird. Dadurch erklärt sich die Wirksamkeit der doppelten Fenster und der doppelten Thüren, um ein Zimmer warm zu halten. Das schlechte Leitungsvermögen lockerer Körper, wie Stroh, Wolle u. s. w., rührt größtentheils daher, daß die zahllosen Zwischenräume mit Luft ausgefüllt sind. Solche Körper, von denen wir sagen, daß sie warm halten, wie z. B. unsere Kleider, Stroh, sind nicht selbst warm, ihre Wirkung beruht nur auf ihrer schlechten Wärmeleitungsfähigkeit; wenn man Eis in solche Körper einhüllt, so verhindern sie das Schmelzen desselben, weil sie die äußere Wärme abhalten.

Fünftes Kapitel.

Verschiedene Quellen der Wärme.

Wärmeerzeugung durch chemische Verbindungen. Nach der Sonne sind für uns die chemischen Verbindungen die wichtigsten Wärmequellen. Fast jeder chemische Proceß ist von einer Wärmeentwickelung begleitet. 252

Fig. 532.



Von ganz besonderer Wichtigkeit ist die Entwickelung der Wärme, welche durch Verbrennung, also durch eine rasche Verbindung der Körper mit Sauerstoff, entwickelt wird.

Um die durch Verbrennung entwickelte Wärme zu bestimmen, bediente sich **Rumford** des in Fig. 532 abgebildeten Apparates; der Kasten *A* ist mit Wasser gefüllt, durch welches ein Schlangenrohr hindurchzieht. Der Eingang in das Schlangenrohr ist durch

einen Trichter gebildet, unter welchen die zu verbrennenden Körper gebracht werden. Mit Oel und Alkohol ist der Versuch leicht anzustellen; man füllt sie nämlich in eine kleine Lampe, die man zu Anfange und zu Ende des Versuches wägt, um die Menge des verbrannten Materials zu erfahren. Die Flamme und die Producte der Verbrennung ziehen durch das Schlangenrohr hindurch und erwärmen das Wasser des Apparates. Aus der Temperaturerhöhung, welche das Wasser mit dem ganzen Apparate erfährt, läßt sich dann die Wärmemenge, welche durch die Verbrennung erzeugt wurde, berechnen; doch darf man dabei die Wärme nicht unberücksichtigt lassen, mit welcher die gasförmigen Producte der Verbrennung aus dem Schlangenrohre austreten.

Durch solche Versuche ergab sich, daß durch die Wärme, welche entwickelt wird bei

der Verbrennung von 1 Gramm,	die Temperatur von 1 Kilogramm Wasser erhöht werden kann um
Wasserstoffgas	36,40°
Oelbildendes Gas	12,20
Absoluter Alkohol	6,96
Kohle	7,29
Wachs	10,50
Rüböl	9,31
Talg	8,37.

253 **Thierische Wärme.** Die Temperatur der Blutwärme aller Thiere ist fast immer von der Temperatur des Mittels verschieden, in welchem sie leben. Die Thiere der Polarländer sind stets wärmer als das Eis, auf welchem sie leben, in den Aequatorialgegenden aber sind sie oft kälter als die glühende Luft, welche sie einathmen. Die Vögel haben nie die Temperatur der Luft, die Fische nie die Temperatur des Wassers, von welchem sie umgeben sind; der thierische Körper hat also seine eigenthümliche Wärme, er muß sie also auch fortwährend erzeugen können.

Die innere Wärme des Menschen scheint für alle Organe dieselbe und zwar derjenigen gleich zu seyn, auf welche ein kleines Thermometer steigt, wenn man die Kugel unter die Zunge bringt und den Mund schließt, bis es nicht mehr steigt; diese Temperatur ist 37° C. Alter und Klima, Gesundheit oder Krankheit können diese Temperatur nur unbedeutend ändern.

Die Blutwärme der Vögel ist größer als bei allen anderen Thieren, sie beträgt im Durchschnitt 42°; die Blutwärme der Säugethiere ist der des Menschen sehr nahe gleich. Bei den Vögeln und Säugethieren ist die Blutwärme von der Temperatur der Umgebung unabhängig; bei den übrigen Thierklassen aber, den Amphibien, Fischen u. s. w., ist die Temperatur des Körpers nur wenig von der Temperatur der Umgebung verschieden.

Welches ist nun die Quelle der thierischen Wärme? Die Luft, welche wir einathmen, wird in derselben Weise verändert wie die Luft, welche zur Verbrennung gedient hat; der Sauerstoff der Luft wird in Kohlensäure verwandelt

es findet also im Körper eine förmliche Verbrennung Statt. Seit Lavoisier diese Entdeckung gemacht hatte, war die Quelle der thierischen Wärme kein Geheimniß mehr.

Durch die Speisen wird dem Blut der Kohlenstoff zugeführt, welcher sich vorzugsweise in den capillaren Verzweigungen der Adern mit dem Sauerstoff der eingeathmeten Luft verbindet; durch die Oxydation des Kohlenstoffs im Thierkörper muß aber nothwendig dieselbe Wärmemenge erzeugt werden, als ob der Kohlenstoff durch schnelle Verbrennung in Kohlensäure verwandelt worden wäre.

In einer kalten Umgebung verliert der Mensch und das Thier stets mehr Wärme als in wärmerer; da aber die Blutwärme bei den Säugethieren und Vögeln von der Temperatur der Luft unabhängig ist, so ist klar, daß im Körper mehr Wärme erzeugt werden muß, wenn ihm in jedem Augenblicke eine größere Wärmemenge entzogen wird, wenn er also in kalter Luft lebt, als wenn er in wärmerer Umgebung nur wenig Wärme nach außen hin abgiebt. Um aber in gleichen Zeiten mehr Wärme erzeugen zu können, muß dem Körper mehr Kohlenstoff zugeführt werden, durch dessen Oxydation die Wärme erzeugt wird, wie man ja auch bei kaltem Wetter mehr Brennmaterial im Ofen verbrennen muß, um ein Zimmer auf einer bestimmten constanten Temperatur zu erhalten, als bei gelinder Kälte. Dadurch erklärt sich nun, warum der Nordländer mehr Speisen und besonders mehr kohlenstoffhaltige Speisen zu sich nehmen muß als der Bewohner der heißen Zone.

Wärmeentwickelung durch mechanische Mittel. Durch die 254
Compression der Luft wird Wärme frei. Findet die Compression der Luft rasch statt, so kann dadurch eine sehr bedeutende Temperaturerhöhung bewirkt werden, und darauf gründet sich das pneumatische Feuerzeug. Die Flüssigkeiten, welche sich nur wenig comprimiren lassen, zeigen auch nur eine unbedeutende Temperaturerhöhung. Feste Körper werden durch Compression oft bedeutend erhitzt, wie man dies beim Hämmern der Metalle und beim Prägen der Münzen beobachten kann. Ob die Temperaturerhöhung fester Körper durch Compression gleichfalls dem Umstande zugeschrieben werden muß, daß mit der größeren Dichtigkeit ihre specifische Wärme geringer wird, daß also ein Theil der Wärme, welche als specifische Wärme in denselben enthalten war, nun bei ihrer Compression als fühlbare Wärme austritt, ist noch nicht mit Sicherheit entschieden.

Welche bedeutende Temperaturerhöhungen durch Reibung hervorgebracht werden können, ist allgemein bekannt. Ein eiserner Radschuh erhitzt sich oft so, daß er zischt, wenn er mit Wasser in Berührung kommt; trockenes Holz läßt sich durch Reibung entzünden, ja an einem laufenden Schleifsteine von großem Durchmesser soll ein eiserner Nagel weißglühend werden. Bis jetzt ist man noch nicht im Stande, eine genügende Erklärung dieser Erscheinungen zu geben.

Theoretische Ansichten über die Wärme. Wir haben nun die wich- 255
tigsten Gesetze der Wärmeerscheinungen kennen gelernt, ohne daß die Rede davon

gewesen wäre, was denn eigentlich die Wärme sey. In dieser Beziehung ist also die Wärmelehre ganz so behandelt worden, wie der erste Theil der Lehre vom Lichte, wo auch die empirischen Gesetze der Spiegelung und Brechung entwickelt wurden, ohne weiter nach dem Wesen des Lichtes zu fragen; eine Theorie aber, aus welcher sich alle Wärmeerscheinungen nicht nur der Art, sondern auch der Größe nach so vollständig ableiten lassen, wie die Lichtphänomene aus der Wellentheorie, fehlt bis jetzt noch.

Gewöhnlich stellt man sich die Wärme als einen imponderablen Stoff vor, welcher die Körper durchdringt; diese Vorstellung paßt sich mancher Erscheinung, wie z. B. der Wärmebindung, der Wärmecapacität, ganz gut an, sie giebt uns für diese Erscheinungen ein ganz gutes Bild, ja die Ausdrücke sind auch mit Zugrundelegung dieser Ansicht geschaffen. Wenn sich aber auch die Erscheinungen der Wärmecapacität, der latenten Wärme, die Wärmeleitung ganz gut mit der Vorstellung des Wärmestoffs vertragen, so ist es doch auf der anderen Seite höchst unwahrscheinlich, daß es einen solchen gebe, wie denn wohl überhaupt imponderable Stoffe aus der Physik verschwinden werden, wie es beim Lichte schon der Fall ist. In der Wärmelehre steht der große Schritt, welcher der Einführung der Vibrationstheorie beim Lichte entspricht, wohl am nächsten bevor.

Einige Erscheinungen sind mit der Annahme des Wärmestoffs gar nicht zu vereinigen: die Wärmestrahlung und Erzeugung der Wärme durch Reibung.

Die Gesetze der strahlenden Wärme sind denen der Lichtstrahlung so ähnlich daß die Idee nahe liegt, auch die Wärmestrahlung einer Aethervibration zuzuschreiben. Wenn aber die strahlende Wärme durch Vibrationen des Aethers sich fortpflanzt, so müßte die fühlbare Wärme durch Vibrationen der materiellen Theile der Körper selbst hervorgebracht werden.

Daß die Wärmeerscheinungen in der That von solchen Vibrationen herrühren, ist höchst wahrscheinlich, obgleich wir noch nicht im Stande sind, alle Erscheinungen der Wärme aus dieser Hypothese nur einigermaßen genügend abzuleiten und wir die Vorstellung eines Wärmestoffs zur leichteren Darstellung und Uebersicht noch nicht wohl entbehren können.

Alphabetisches Inhaltsverzeichniß.

Seite

A.

Ablenkung der Magnetnadel durch den galvanischen Strom . . 357
Absorption der Gase 103
» der Wärmestrahlen . 451
Achromatismus 233
Adhäsion 49
» zwischen festen und flüssigen Körpern 71
Aggregatzustände 6
» Veränderung derselben durch die Wärme . . . 412
Akustik 158
Ampère'sche Regel 359
» Theorie 383
Anelektrische Körper 301
Anode 356
Aräometer 64
Arbeit einer Kraft 123
Archimedisches Princip 60
Atmosphäre 81
Atmosphärendruck 85
Atom 5
Atomistische Theorie 5
Auftrieb 60
Augen, einfache 237
» zusammengesetzte . . . 236
Ausdehnbarkeit 5
Ausdehnung durch die Wärme . 402
» der festen Körper. . 406
» der Flüssigkeiten . . 410
» der Gase 411
» kubische 408
Ausflußgeschwindigkeit der Flüssigkeiten 135

Seite

Ausflußgeschwindigkeit der Gase . 156
Ausflußmenge 138
Axen, optische der Hohlspiegel . 204
» » der Linsen . . . 219
» » doppeltbrechender Krystalle . . . 276
» » secundäre der Linsen 223

B.

Barometer 85
Barometerprobe 95
Becquerel'sche Kette 339
Beharrungsvermögen 8
Bewegung, gleichförmige . . . 106
» beschleunigte und verzögerte 106
Bilder Daguerre'sche 280
» der Converspiegel . . . 210
» der Hohlspiegel 207
» der Linsen 223
» ebener Spiegel 202
Blasebalg 155
Bleiloth 9
Berührungselektricität 330
Beugung des Lichtes 265
Bindung der Elektricität . . . 319
» » Wärme 413
Bodendruck der Flüssigkeiten . . 56
Brechung der Wärmestrahlen . . 455
» der Lichtstrahlen . . . 211
» doppelte 275
Brechungsexponent 213
Brechungsgesetz 211
Brennpunkt der Hohlspiegel . . 205
» der Linsen 221
Brückenwage 42
Bunsen'sche Säule 340

Seite

C.

Calorimotor, Hare's 339
Camera obscura 250
Capillarität 72
Chemische Wirkungen des Lichtes 279
» » des galvanischen Stromes 343
Centralbewegung 113
Centrifugalkraft 117
Centripetalkraft 114
Circularpolarisation 277
Cohäsion zwischen den Theilchen der Flüssigkeiten 74
Cohäsionskraft 7
Communicirende Gefäße . . . 54
Compas 292
Compressionspumpe 97
Condensator, elektrischer . . . 323
» der Dampfmaschinen 431
Constante Ketten 339
Concavspiegel 204
Convexspiegel 210

D.

Daguerrotype 280
Daniell'sche Säule 340
Dalton'sches Gesetz 422
Dampfbildung 416
Dampfelektricität 313
Dampfmaschine 424
Dauer des Lichteindruckes . . . 245
Declination der Magnetnadel . . 289
Declinationsbussole 291
Dehnbarkeit 45
Diamagnetismus 395
Dichtigkeit 11
Differentialthermometer 449
Druck der Luft 83
» hydrostatischer 56
Druckpumpe 88
Dynamik 13

E.

Echappement 130
Echo 172
Einfallsloth 201
Einfallswinkel 201
Elasticität 44
» der Flüssigkeiten . . . 77
» der Luft 82
Elektricität 300
» gebundene 319
» positive und negative . 302

Seite
Elektrische Batterie 322
» Büschel 326
» Fluida 302
» Telegraphie 376
» Vertheilung 305
Elektrisches Glockenspiel . . . 312
» Licht 325
» Pendel 300
Elektrisirmaschine 309
Elektrochemische Theorie . . . 351
Elektrolyt 356
Elektrolytisches Gesetz 353
Elektromagnet 373
Elektromagnetische Motoren . . 374
Elektrometer 307
Elektromotorische Kraft . . . 332
» verschiedener galvanischer Apparate 371
Elektrophor 309
Emanationstheorie 260
Endosmose 78
Excentrische Scheibe 429
Expansionskraft 7
» der Luft . . . 82
Extrastrom 389

F.

Fallgesetze 107
Fallmaschine 109
Fallröhre 97
Farben, complementäre 230
» dünner Gypsblättchen . 276
» dünner Schichten . . . 268
» prismatische 227
Farbenringe, Newton'sche . . . 268
» Nobili'sche 350
Fernrohre 255
Fernsichtigkeit 241
Festigkeit 45
Feuerspritze 99
Flammenbogen, galvanischer . . 343
Flaschenzug 33
Fliehkraft 117
Franklin'sche Tafel 319

G.

Galvanismus 329
Galvanometer 359
Galvanoplastik 347
Gasometer 150
Gebläse 153
Gehörorgan 191
Geschwindigkeit des Schalles in der Luft 171
Geschwindigkeit des Lichtes . . 195

Seite
Gewicht 9
» specifisches 11
Glaselektricität 302
Gleichgewicht 37
Glühen, galvanisches 342
Gramm 9
Grove'sche Säule. 341

H.

Haarröhrchen 72
Harzelektricität 302
Haspel 30
Hebel 23
Heber 89
Hemmung 130
Heronsball 98
Heronsbrunnen 101
Hochdruckmaschine . . . . 424—431
Hohlspiegel 204
Hufeisenmagnet 287
Hydraulische Presse 53
Hydrodynamik 135
Hydrostatik 51

I.

Idioelektrische Körper 301
Inclination der Magnetnadel . . 292
Induction elektrischer Stöme durch Magnete 390
Inductionsströme 386
Intensität des Erdmagnetismus . 295
Interferenz der Lichtstrahlen . . 263
Isolatoren, elektrische 301
Isolirschemel 304

K.

Kaleidoskop 203
Kammer, dunkle 250
Kathode 356
Kehlkopf 189
Keil 22
Klangfiguren 167
Knotenlinie 166
Knotenpunkte 165
Krystallisation 50
Kurzsichtigkeit 239

L.

Latente Wärme der Dämpfe . . 440
» » der Flüssigkeiten . 414
Lebendige Kraft 125

Seite
Leidner Flasche 321
Leiter der Elektricität 301
Leitungswiderstand, elektrischer . 370
Licht 195
Lichtentwickelung durch den galvanischen Strom 342
Lichtwellen 261
» Länge derselben . . . 268
Linsen 217
» achromatische 234
Linsenbilder 223
Liter 10
Locomotive 433
Luftdruck 83
Luftpumpe 92
Luftwellen, stehende 173
Lupe 252

M.

Magdeburger Halbkugeln . . . 96
Magnete, künstliche 282
» natürliche 282
Magnetische Armaturen 286
» Flüssigkeiten . . . 284
» Magazine 286
» Pole 282
» Wirkung in der Ferne 297
» Wirkungen des galvanischen Stromes 357
Magnetisirung durch den galvanischen Strom . . 372
» durch Streichen . 288
Magnetismus 282
Magnetnadel 289
Magnetoelektrische Rotationsmaschine 391
Manometer 101. 155
Mariotte'sches Gesetz 90
Masse 10
Meter 10
Mikroskop 255
Molekül 5
Molekularkräfte 7
Multiplicator 359

N.

Nachbilder 247
Nicholson's Aräometer 64
Niederdruckmaschine 430

O.

Ohm'sches Gesetz 365

Seite

P.

Parallelogramm der Kräfte . . 14
Papinianischer Topf 438
Pendel einfaches 119
» elektrisches 300
» materielles 127
Pendeluhr 128
Pfeifen, gedeckte 173
» offene 179
Phenakistoskop 246
Photographie 280
Photometer 198
Physiologische Wirkungen der Säule 341
Polarisation des Lichtes 270
» galvanische 361
Porosität 5
Presse, hydraulische 53
» Schrauben- 21
Prismen 215
» achromatische 233
Pumpe 87

R.

Räderwerke 31
Reaction des ausfließenden Wassers 141
Reactionsrad 146
Reflexion der Lichtstrahlen . . . 201
» der Schallstrahlen . . 172
» der Wärmestrahlen . . 452
Recipient 94
Reibung 131
Reibungselektricität 300
Resonanzboden 188
Resultirende 14
Rolle 31
Rotation beweglicher Ströme . . 385
Rückschlag, elektrischer 328

S.

Saugen durch ausströmende Gase 157
» durch den ausfließenden Strahl 140
Saugpumpe 88
Säule, trockene 335
» Volta'sche 333
Scalenaräometer 66
Schallwellen 168
Schatten 195
Schiefe Ebene 17
Schmelzpunkte 413
Schmelzung 412

Seite
Schraube 19
Schraubenpresse 21
Schwere 8
» der Luft 81
Schwerpunkt 35
Schwingungen, fortschreitende . . 159
» stehende . . . 159
Schwingungsknoten 165
» in gedeckten Pfeifen . 177
» in offenen Pfeifen . 179
Schwingungspunkt 127
Schwingungszahl verschiedener Töne 181
Schwungkraft 117
Schwungmaschine 118
Segner's Wasserrad 142
Sehweite 239
Seilwellen 163
Seitenkräfte 14
Seitendruck der Flüssigkeiten . . 59
» beim Ausströmen der Flüssigkeiten . . . 141
» beim Ausströmen der Gase 157
Sicherheitsröhre 101
Sicherheitsventil 102
Siedepunkt, Abhängigkeit desselben vom Druck 437
Sonnenmikroskop 254
Spannkraft der Dämpfe . . . 420
» » Luft 82
Spannungsreihe . . . . 332—351
Specifische Wärme 445
Specifisches Gewicht 11
Spectrum 226
Spiegel, ebene 201
» sphärische 204
Spiegelteleskope 259
Sprödigkeit 45
Statik 13
Stechheber 89
Stimmorgan 189

T.

Tabelle der Festigkeit 46
» » specifischen Gewichte . 70
Tangentenbussole 362
Tangentialkraft 114
Telegraphen, elektrische 377
Teleskope 259
Theilbarkeit 4
Thermoelektrische Säulen . . . 397
» Ströme . . . 397
Thierische Elektricität . . . 399

	Seite
Thermometer	402
Töne gespannter Saiten . . .	184
» musikalische	181
» Schwingungszahl derselben	183
Toise	10
Tonleiter	182
Toricelli'sche Leere	85
» Röhre	85
» Theorem	135
Trägheit	8
Trogapparat	337
Tropfenbildung	73
Turbinen	145

U.

Undulationstheorie	261
Unterbrechungsrad	388

V.

Variationen der magnetischen Declination und Inclination . .	294
Vertheilung der Elektricität . .	305
Vibrationstheorie	261
Voltameter	344
Volta'sche Säule	333
Volta'scher Fundamentalversuch .	331
Volumeter	67

W.

	Seite
Wage	38
Wärme	402
» gebundene der Dämpfe . .	440
» » » Flüssigkeiten	413
» specifische	445
Wärme, strahlende	447
Wärmeentwickelung durch den galvanischen Strom	342
Wärmeentwickelung durch Reiben	459
Wärmeleitung	455
Wärmequellen	457
Wasserräder, vertikale	142
» horizontale . . .	144
Wassersäulenmaschine	149
Wasserwellen	161
Wasserzersetzung, galvanische . .	343
Wellen	160
Wellenlänge	163
Windbüchse	98
Winde	30
Windmesser	155
Winkelspiegel	203
Wollaston'sche Säule	337
Wunderscheibe	246
Wurfbewegung	112

Z.

Zerlegung der Kräfte	17
» galvanische des Wassers	344
Zerstreuende Kraft	232
Zerstreuung des weißen Lichtes .	226
Zitteraal	401
Zitterrochen	400
Zungenpfeifen	186
Zusammendrückbarkeit	5
» der Flüssigkeiten . .	77
Zusammensetzung des weißen Lichtes	229
Zusammenziehung des ausfließenden Strahles	139

v = t.c. [illegible]